Faccia a faccia

Dalle cellule staminali alle armi nucleari, in esclusiva da «Nature» ecco la scienza che vogliono Kerry e Bush

Impegnati in una frenetica caccia al voto, George W. Bush e John Kerry non hanno tralasciato alcuna occasione di polemica. Si sono scontrati persino sulla scienza: durante la Convention democratica di luglio, Kerry ha sollevato il problema della ricerca sulle cellule staminali embrionali, e poco dopo Bush l'ha accusato di tentennamenti sulla questione del deposito di scorie nucleari in Nevada.

Alcuni settori della comunità scientifica si sono inseriti nel confronto, e la campagna di Kerry ha guadagnato il convinto sostegno di un gruppo di 48 premi Nobel. Il fatto che gran parte degli interventi siano dalla parte di Kerry la dice lunga sulle recenti tendenze politiche negli Stati Uniti.

Il paese è profondamente diviso, e sia gli scienziati sia i campus universitari sono diventati decisamente ostili ai repubblicani.

Ma gli scienziati vanno fieri della loro abitudine a valutare oggettivamente i fatti. Così, per la prima volta nella storia di «Nature», abbiamo dato ai candidati l'opportunità di rivolgersi direttamente ai ricercatori. Tra le 50 domande proposte dalla redazione ne abbiamo scelte 15, e abbiamo chiesto a Bush e Kerry di rispondere in 1500 parole.

Le risposte inviate da Bush sono state più lunghe di circa un terzo, e sono state riviste in redazione; Kerry si è mantenuto entro il limite, e le sue risposte sono pubblicate integralmente.

Ci auguriamo che il risultato serva a dare un'idea delle posizioni dei due candidati. Su alcuni temi, quale l'equilibrio generale dei finanziamenti alla ricerca, non ci sono differenze degne di nota; su altri, come il riscaldamento globale, le loro posizioni sono diametralmente opposte.

Questi temi vanno ben al di là delle questioni interne degli Stati Uniti. Come ha osservato un paio d'anni fa il finanziere George Soros: «Nel moderno capitalismo globale, solo gli americani votano. I brasiliani no.» Vale a dire che, quando si tratta di scelte in materia economica, militare e così via, è molto probabile che le decisioni della Casa Bianca abbiano sul vostro paese un impatto maggiore di quelle del vostro stesso Governo. Ecco perché, a novembre, dalla più remota provincia della Cina alle dinamiche capitali d'Europa, milioni di occhi saranno puntati sui voti degli americani. Speriamo che li contino come si deve.

Colin McIlwain, news editor di «Nature»

S.Marcus, Brooks Kraft, Royalty Free/Corbis/Contrasto; elaborazione Giovanna Salvini

Bush contro Kerry

LA SICUREZZA NAZIONALE è una priorità per entrambi i candidati, ma i modi per garantirla sono ben diversi. Bush e Kerry hanno posizioni diametralmente opposte sia sui sistemi di difesa missilistica sia sulla prosecuzione della ricerca di armi nucleari di nuova generazione.

Per la prima volta nella sua storia, la rivista britannica «Nature» ha posto ai due candidati alla Casa Bianca una serie di quesiti sulla loro politica scientifica. Ecco il testo integrale delle loro risposte

AP Photo/Jerome Favre

AP Photo/HO, Department of Defense

1 **L'aumento dei controlli sui viaggi di scienziati stranieri negli Stati Uniti, introdotto per ragioni di sicurezza interna, non rischia di isolare la scienza americana, minacciando la leadership scientifica del paese? Se è così, che cosa si può fare per mantenere aperto il dialogo tra la scienza americana e il resto del mondo?**

BUSH: La mia Amministrazione riconosce l'importanza dei contributi di scienziati e studenti stranieri all'impresa scientifica nazionale, ma è anche consapevole dell'importanza di tutelare la nostra sicurezza. Noi continueremo a dare il benvenuto agli studenti e agli scienziati internazionali, applicando al tempo stesso misure calibrate per mettere fine all'abuso del sistema dei visti studenteschi. Siamo già riusciti a ottenere significativi successi nel ridurre gli attuali ritardi nella concessione dei visti. Abbiamo aumentato la sicurezza, pur accelerando i controlli, e sono già state chiuse circa 1000 pratiche arretrate.

KERRY: Scienza e sicurezza non sono inconciliabili. Dopo l'11 settembre, l'America ha avviato misure importanti per migliorare i controlli delle richieste di ingresso negli Stati Uniti. Tuttavia, possiamo perfezionare ancora il nostro sistema di concessione dei visti in modo da esaminare più velocemente le richieste di scienziati e studenti autentici, individuando al tempo stesso le persone che rappresentano un vero rischio per la sicurezza. Con più risorse e procedure migliori, non saremo costretti a scegliere tra collaborazione scientifica e sicurezza nazionale.

2 **Negli ultimi mesi, i consulenti scientifici del Governo a vari livelli sono stati più volte accusati di farsi influenzare dalla politica. Che cosa farebbe per garantire che la sua Amministrazione riceva pareri scientifici autenticamente imparziali?**

BUSH: Il mio Governo è fortemente impegnato nell'assicurare al processo decisionale i più alti standard scientifici. Ho chiesto spunti e consigli alle migliori menti scientifiche – dentro e fuori l'Amministrazione – su temi che vanno dal cambiamento climatico alle nanotecnologie, rivolgendomi in particolare alle Accademie Nazionali indipendenti. Il mio impegno per una consulenza scientifica valida e indipendente è incrollabile. Non a caso, il mio consulente scientifico alla Casa Bianca, John Marburger, è un democratico.

KERRY: La mia Amministrazione non baserebbe mai le proprie politiche pubbliche su pareri scientifici di parte. Come presidente, sarò al servizio dell'interesse collettivo. E per servire la nazione nel modo migliore bisogna prendere decisioni efficaci basate su pareri di esperti davvero imparziali.

AP Photo/Los Alamos National Laboratory/LeRoy N. Sanchez

3 **Qual è la soluzione a lunga scadenza alla graduale fuga di conoscenze sulle armi di distruzione di massa, in particolare di quelle biologiche?**

BUSH: Impedire la diffusione delle conoscenze è complicato, se non impossibile. La chiave per fermare la proliferazione delle armi di distruzione di massa è impedire a chi cerca di ottenerle di accedere ai componenti più significativi e tecnicamente avanzati di quelle armi. Una priorità fondamentale è riconvertire gli scienziati precedentemente impegnati nel settore bellico in impieghi di produzione civile. La mia Amministrazione ha lanciato la G8 Global Partnership, un programma da 20 miliardi di dollari per appoggiare i progetti di non proliferazione, disarmo, antiterrorismo e sicurezza nucleare nell'ex Unione Sovietica. Per quel che riguarda le armi nucleari, il primo passo è impedire l'accesso al materiale fissile. In questo campo stiamo facendo buoni progressi grazie a misure come la Global Threat Reduction Initiative e al nostro impegno concreto per la sicurezza in Russia.

KERRY: Non è un problema che potremo risolvere da soli, ma che richiederà una leadership americana in grado di costruire un consenso internazionale su come gestire queste armi e la tecnologia, che spesso ha un uso sia civile sia militare, su cui sono basate. Io lavorerò a stretto contatto con la comunità scientifica allo sviluppo di un sistema di sorveglianza responsabile della ricerca biomedica, tale da garantire che gli agenti patogeni letali si trovino solo nelle mani di coloro che hanno legittime esigenze di ricerca. Troveremo insieme la strada per limitare la possibilità che il sapere e le competenze scientifiche siano usati per nuocere.

4 **Lei è favorevole a progetti di ricerca di nuove armi nucleari negli Stati Uniti? E se è contrario, come vede il ruolo futuro dei tre laboratori nazionali che si occupano di nucleare militare?**

BUSH: I nostri laboratori stanno facendo un ottimo lavoro nell'affrontare le minacce del XXI secolo. Inoltre, essi rappresentano una straordinaria risorsa per i nostri sforzi di migliorare la sicurezza interna, sono la fonte di incomparabili progressi tecnologici e stanno aiutando l'America a vincere la Guerra al Terrorismo. La *Nuclear Posture Review*, il rapporto sulle strategie nucleari diffuso dalla mia Amministrazione nel gennaio 2002, sottolineava che dopo la fine della guerra fredda l'infrastruttura nucleare nazionale si è atrofizzata, e che il mutamento delle condizioni di sicurezza richiede un'infrastruttura flessibile, reattiva e con più sistemi d'arma. Per questa ragione, il mio budget per l'anno fiscale 2005 contiene un aumento delle attività per gli armamenti rispetto al 2004.

KERRY: Io metterò fine alla ricerca di armi nucleari di nuova generazione. I nostri laboratori nazionali svolgono un ruolo fondamentale nel mantenimento degli arsenali esistenti e nel garantire che le armi nucleari che già abbiamo siano protette, sicure e affidabili. Inoltre, i laboratori hanno, e continueranno ad avere, una parte importante nel prevenire la diffusione delle armi di distruzione di massa e nell'avanzamento della scienza per la sicurezza nazionale.

5 **Alcuni fisici hanno messo in dubbio l'efficacia del sistema di difesa missilistica degli Stati Uniti. Lei aumenterebbe o ridurrebbe la spesa per la difesa missilistica? E sottoporrebbe a una valutazione scientifica indipendente le tesi a essa favorevoli?**

BUSH: All'inizio del mio mandato, ho chiesto un'analisi dell'intero spettro di tecnologie disponibili e dei criteri di base di difesa missilistica in grado di proteggere gli Stati Uniti, le forze americane di stanza all'estero e i nostri amici e alleati. La nostra strategia è sviluppare e installare il prima possibile difese missilistiche balistiche basate sulle migliori tecnologie disponibili. Verso la fine di quest'anno, diventeranno operativi i primi elementi del sistema missilistico di difesa dell'America. Questo soddisferà l'impegno che ho preso con il popolo americano oltre quattro anni fa. Svilupperemo e schiereremo le tecnologie necessarie alla difesa del nostro popolo.

KERRY: Non sono a favore di uno schieramento rapido della difesa missilistica. In questa fase non dovremmo sprecare denaro nelle installazioni. Sono invece favorevole a portare avanti ulteriori ricerche, progetti e sperimentazioni. Quanto alla valutazione scientifica indipendente, il carattere confidenziale di gran parte delle attività in questione impone cautela. Come minimo, dobbiamo impegnarci a fondo per ridare credibilità al processo di revisione interna. La verità è che l'Amministrazione Bush ha distrutto la propria credibilità in questo campo, specialmente con la sua fretta di schierare la difesa missilistica. Perciò, dobbiamo ridare credibilità al nostro processo di revisione interna, sottoponendo i sistemi a test operativi realistici per essere certi che funzionino davvero.

6 **Gli Stati Uniti dovrebbero aderire senza riserve alla costruzione di ITER, la struttura di ricerca sulla fusione nucleare in discussione? Quali misure intraprenderebbe per contribuire al successo di progetti scientifici internazionali come questo?**

BUSH: Ho impegnato gli Stati Uniti a unirsi a ITER agli inizi del 2003. ITER è un esperimento di importanza capitale per mettere alla prova la fattibilità della fusione nucleare come fonte di elettricità e idrogeno. Insieme a molti altri paesi, gli Stati Uniti han-

INVIARE ASTRONAUTI SU MARTE è un obiettivo grandioso, ma secondo Kerry, che pure lo condivide, l'Amministrazione Bush non ha dato alla NASA i fondi necessari per raggiungerlo. Anche sugli organismi geneticamente modificati le posizioni sono sostanzialmente simili.

no un ruolo fondamentale nel lancio di ITER, che è al primo posto tra le priorità del Department of Energy.
KERRY: Il mio piano energetico attingerà alle risorse di iniziativa e creatività del paese per rafforzare la sicurezza nazionale, far crescere la nostra economia e proteggere l'ambiente. Riguardo a ITER, John Edwards e io siamo favorevoli a un programma USA sulla fusione nucleare strategicamente bilanciato, che include la partecipazione a ITER come integrazione a un forte impegno scientifico e tecnologico interno. Da presidente, il mio primo atto a livello internazionale su questa e altre questioni energetiche consisterà nel coinvolgere altre nazioni nella ricerca di aree di cooperazione su un terreno comune.

7 Pensa che gli Stati Uniti debbano inviare astronauti sulla Luna o su Marte entro i prossimi 10 o 15 anni? Se sì, perché mandare esseri umani invece di robot? Se no, a che cosa servono lo space shuttle e la stazione spaziale?
BUSH: Lo scorso gennaio ho annunciato la mia visione per il futuro del programma di esplorazione spaziale americano. Contemporaneamente al completamento dell'International Space Station, stiamo sviluppando un nuovo veicolo spaziale con equipaggio umano per esplorazioni al di là dell'orbita terrestre. Questo veicolo sarà sperimentato entro il 2008 e svolgerà la prima missione con equipaggio non più tardi del 2014. L'America ritornerà sulla Luna non prima del 2015 e non più tardi del 2020, utilizzandola come trampolino di lancio per missioni umane oltre il nostro satellite. Inizieremo con missioni robotizzate, seguite da missioni umane. Un'ampia presenza umana sulla Luna può ridurre i costi di nuove esplorazioni.
KERRY: Grazie a decenni di investimenti pubblici nell'impresa spaziale, oggi un equipaggio internazionale di astronauti vive e lavora nello spazio sull'International Space Station, una dozzina di americani ha camminato sulla Luna, abbiamo rover sulla superficie di Marte e una serie di sonde che continuano l'esplorazione del nostro sistema solare. La NASA è una risorsa di valore inestimabile per il popolo americano e deve ricevere finanziamenti adeguati per proseguire la sua importante missione. Ma c'è ben poco da aspettarsi da un programma spaziale che fissa obiettivi grandiosi senza però sostenerli con finanziamenti realistici. John Edwards e io siamo impegnati ad aumentare i fondi per la NASA e l'esplorazione spaziale, perché questo non solo porta contributi essenziali alla nostra economia, ma amplia anche la nostra comprensione del mondo in cui viviamo.

AP Photo/Neil Armstrong/NASA

8 Alcuni ricercatori hanno espresso la loro preoccupazione per quello che ritengono un crescente divario tra i fondi destinati alla ricerca biomedica e quelli per altri settori, comprese la fisica e le scienze ambientali. È d'accordo con loro? E in questo caso, che cosa intende fare?
BUSH: La mia Amministrazione si è impegnata a finanziare la ricerca di base e ha prestato ascolto ai timori della comunità scientifica e dei legislatori, assicurando loro che esiste una priorità federale per il finanziamento delle scienze fisiche così come delle scienze della vita. I miei budget rappresentano un segno tangibile che stiamo rispondendo a questi timori.
KERRY: John Edwards e io aumenteremo i finanziamenti federali sia ai National Institutes of Health sia alla National Science Foundation (NSF). Per tutelare la nostra posizione di forza nelle scienze e nella tecnologia, aumenterei specificamente i fondi alla NSF per le scienze fisiche e ambientali, raddoppiando le borse di studio post laurea per la matematica e la scienza. Non dobbiamo lesinare sugli investimenti nazionali nelle future scoperte mediche e tecnologiche. Saranno le scoperte scientifiche a guidare la nostra economia futura, proprio come la scoperta dell'elettricità, del motore a combustione interna e Internet hanno guidato l'economia in passato.

AP Photo/Fresno Bee/Mark Crosse

9 Molti problemi ambientali possono essere attribuiti agli alti livelli dei consumi in nazioni sviluppate come gli Stati Uniti. La scienza e la tecnologia sono in grado di offrire livelli di consumo analoghi a ogni abitante del pianeta? Oppure gli americani devono cambiare il loro stile di vita e consumare di meno?
BUSH: L'America è cambiata in modo molto concreto, non consumando di meno, ma consumando e producendo meglio. Abbiamo dimostrato che la crescita economica rende possibili i progressi ambientali che il nostro paese ha ottenuto e continuerà a ottenere in futuro. Sotto la mia guida, l'America ha avviato produttive partnership internazionali per aiutare i paesi in via di sviluppo a costruire sistemi energetici più moderni. Tenuto conto degli enormi progressi del secolo scorso, non posso e non voglio sottovalutare l'enorme potenziale della scienza e della tecnologia nel continuare a rendere possibili standard di vita migliori a tutti i popoli del mondo.
KERRY: John Edwards e io crediamo che sia possibile proteggere l'ambiente e al tempo stesso rafforzare l'economia. L'America ha vinto più volte le sfide ambientali grazie alla creatività e all'innovazione tecnologica. Ma per anteporre gli interessi della salute pubblica e dell'ambiente a quelli degli inquinatori occorre una leadership forte, e come presidente io capovolgerò i quattro anni di indifferenza verso l'ambiente dell'Amministrazione Bush. Io sono stato uno dei leader della lotta per rafforzare l'economia e proteggere l'ambiente, ho combattuto per ripulire le discariche di rifiuti tossici e tenere pulite la nostra aria e la nostra acqua.

10 È necessario emendare l'Endangered Species Act per renderlo più efficace? E in che modo?
BUSH: Dobbiamo aggiornarlo in modo che offra i maggiori vantaggi alle specie che ne hanno maggiore bisogno. Per esempio, riforme produttive potrebbero includere piani di conservazione degli habitat, *conservation banking* [«banche della conservazione», cioè aree in cui specifici habitat sono protetti grazie a fondi compensativi versati da progetti che danneggiano gli stessi habitat in altre parti del territorio, N.d.R.], accordi volontari con i proprietari dei terreni e collaborazioni tra Governo federale, Stati, tribù e organizzazioni non governative. Questi programmi potrebbero offrire benefici ambientali molto più ampi evitando regolamentazioni e oneri economici e sociali non indispensabili.
KERRY: John Edwards e io siamo a favore della protezione della natura e degli importanti obiettivi dell'Endangered Species Act. Attueremo la legge con spirito cooperativo, in modo da estendere i vantaggi della protezione delle specie selvatiche e degli habitat ai terreni pubblici come a quelli privati. Con finanziamenti adeguati e un approccio cooperativo che funzioni sia per l'ambiente sia per i proprietari di terreni, continueremo a portare avanti la grande tradizione americana di tutela della natura.

AP Photo/ The Bay City Times, Dan Staudacher

11 La maggioranza degli americani pensa che i prodotti transgenici siano sicuri, si stanno sviluppando salmoni transgenici per il mercato alimentare, e i pesciolini fluorescenti geneticamente modificati sono in vendita nei negozi di animali. A suo parere, oltre quale limite diventa problematica la modificazione genetica di piante e animali?
BUSH: Le biotecnologie hanno un ruolo estremamente importante nel ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura e fronteggiare la crescente domanda alimentare del mondo. Ma credo sia importante che il nostro quadro legislativo proceda di pari passo con la scienza. L'Animal and Plant Health Inspection Service del Department of Agriculture ha iniziato a stendere un rapporto sull'impatto ambientale ad ampio raggio per valutare l'efficacia delle norme in materia di biotecnologie. E questo aiuterà il Governo federale a comprendere meglio rischi e benefici.

«ELIMINERÒ IL DIVIETO SULLE STAMINALI EMBRIONALI». Kerry accusa Bush di ostacolare la ricerca scientifica imponendole limiti di carattere ideologico: una posizione che è piaciuta a 48 premi Nobel, che hanno dichiarato pubblicamente il loro appoggio al candidato democratico.

KERRY: John Edwards e io lavoreremo con l'obiettivo di ridurre l'impatto ecologico dell'agricoltura e garantire una produzione alimentare adeguata, sicura e sostenibile. Raddoppieremo gli sforzi dell'Amministrazione per essere certi che le biotecnologie siano sicure per l'alimentazione umana e per l'ambiente. Daremo alle agenzie governative il potere necessario per regolare efficacemente i prodotti contenenti organismi geneticamente modificati, sia prima sia dopo che saranno entrati in commercio. E lavoreremo con la comunità internazionale per dare risposte esaurienti alle sue preoccupazioni e migliorare le relazioni commerciali.

12 La causa del cambiamento climatico globale sono i gas serra generati dal consumo di combustibili fossili? Si tratta di un problema importante per gli Stati Uniti? In caso affermativo, che cosa farebbe la sua Amministrazione per limitare le emissioni di gas serra negli Stati Uniti e all'estero?

BUSH: Il cambiamento climatico globale è un serio problema a lungo termine. Nel 2001 ho chiesto alla National Academy of Sciences (NAS) di raccogliere le informazioni più aggiornate sulla scienza del cambiamento climatico. La NAS ha rilevato che c'è ancora una notevole incertezza sugli effetti delle fluttuazioni naturali sul clima, e sull'impatto che il cambiamento climatico avrà sull'ambiente. La mia Amministrazione è già a buon punto nell'attuazione di una strategia complessiva sul cambiamento climatico destinata a stimolare la ricerca scientifica, allargare l'uso delle nuove energie alternative e delle tecnologie di sequestro del carbonio, e limitare la crescita delle emissioni di gas serra negli Stati Uniti e in collaborazione con altri paesi. Ho creato il nuovo U.S. Climate Change Science Program (CCSP) per rivedere i programmi di ricerca sul clima del Governo federale. La National Academy ha approvato il CCSP sottolineando che esso «esprime una direzione in cui procedere, è adeguatamente ambizioso, ed è di vasta portata». Ho anche impegnato la nazione verso l'obiettivo di ridurre del 18 per cento in dieci anni l'intensità delle emissioni serra americane.

KERRY: Ci sono chiare prove scientifiche che il riscaldamento globale sta già accadendo, e che i crescenti livelli di inquinamento contribuiscono a peggiorare il problema. Per anni, al Senato, ho collaborato con i nostri alleati combattendo per un trattato equilibrato sul riscaldamento globale. Il presidente Bush ha respinto il Protocollo di Kyoto, fino ad abbandonare cocciutamente il tavolo dei negoziati. John Edwards e io riporteremo gli Stati Uniti al tavolo internazionale dei negoziati, lavorando nel paese e attingendo alla creatività dell'industria americana per avviare azioni concrete per ridurre l'inquinamento, ponendo limiti concreti per fermare e invertire la crescita degli inquinanti responsabili del riscaldamento globale.

13 La Food and Drug Administration (FDA) deve mantenere un equilibrio continuo tra il desiderio di approvare rapidamente nuovi farmaci e l'esigenza di garantirne la sicurezza. L'attuale sistema contribuisce a questo equilibrio? In caso contrario, come dev'essere cambiato il sistema?

BUSH: Oggi le procedure della FDA rappresentano il miglior standard mondiale sia per la velocità di accesso dei pazienti alle nuove terapie sia per la garanzia di sicurezza dei farmaci. Nel 2003, la FDA ha approvato 466 tra farmaci nuovi e generici e prodotti biologici, riducendo il tempo necessario per l'esame e l'approvazione di gran parte delle richieste. Oltre a valutare la sicurezza e l'efficacia dei nuovi farmaci, oggi l'agenzia dirige anche i controlli sui 10.000 farmaci già in commercio.

KERRY: Da presidente, assicurerò che la FDA abbia le risorse necessarie per approvare i farmaci in modo sicuro e tempestivo. Come membro del Senato, ho promosso e sostenuto le norme che richiedono alle aziende farmaceutiche di versare una parcella all'agenzia, consentendole di reclutare un maggior numero di esperti e di accelerare significativamente la valutazione e l'approvazione dei farmaci. In seguito al Prescription Drug User Fee Act, la FDA sta approvando rapidamente i nuovi farmaci, e credo che si debba fare di più per garantire la sicurezza di quei medicinali una volta entrati in commercio. La più seria minaccia alla riuscita dell'ampliamento dell'accesso dei pazienti ai progressi della ricerca medica è l'approccio ideologico dell'Amministrazione Bush alle decisioni scientifiche. Quando si tratta di sicurezza dei farmaci e dei prodotti alimentari, la salute pubblica passa in secondo piano rispetto agli interessi particolari e ai pregiudizi ideologici. John Edwards e io sosteniamo un ritorno alla buona scienza tanto nell'FDA quanto in tutto il Governo federale.

AP Photo/UW-Madison University Communications/Jeff Miller

AP Photo/HO/Knoll

14 La malattia della «mucca pazza» e il suo eventuale passaggio all'uomo rappresenta una significativa minaccia potenziale alla salute pubblica negli Stati Uniti? Se è così, quali misure adotterebbe per contenerla?

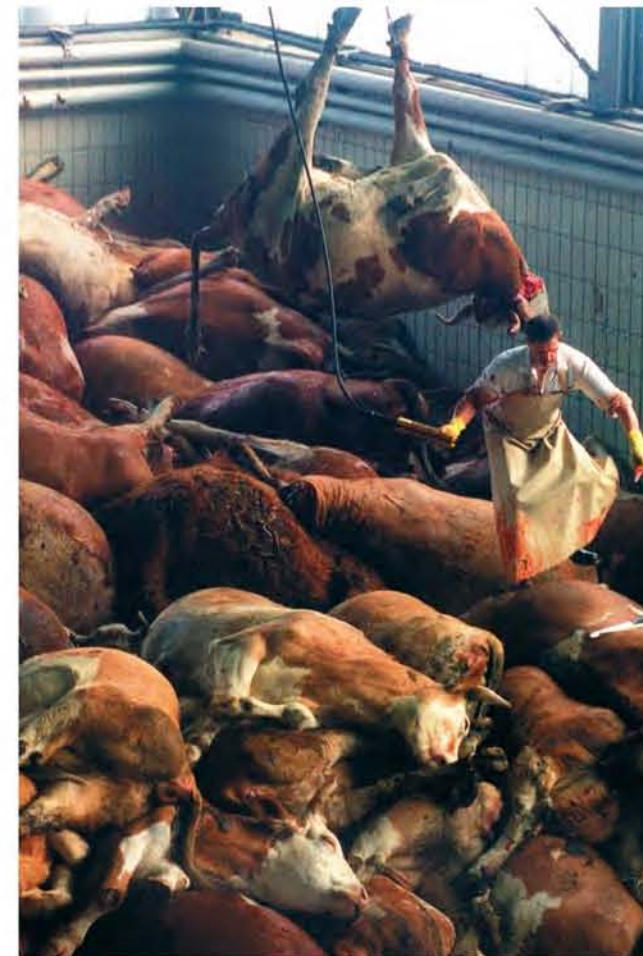
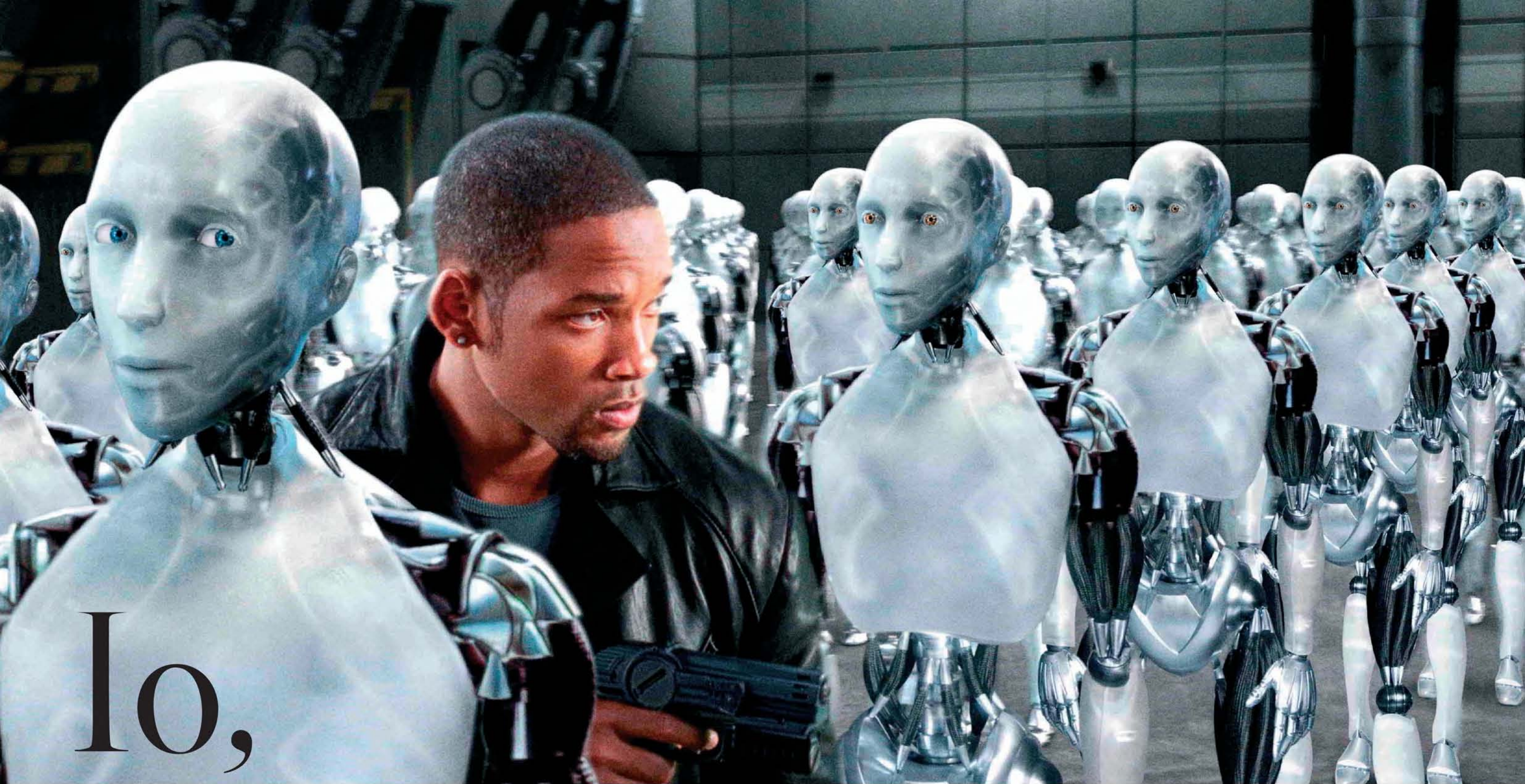
BUSH: La mia Amministrazione sta intraprendendo azioni aggressive per tutelare i consumatori americani contro il cosiddetto «morbo della mucca pazza» (la BSE). Nel dicembre scorso, dopo la scoperta di una mucca contagiata dalla BSE nello Stato di Washington, il Department of Agriculture (USDA) ha preso misure per garantire la sicurezza della nostra carne, tra cui la messa al bando dalla catena alimentare umana dei cosiddetti bovini *downer* [animali in cattive condizioni di salute ma senza diagnosi di BSE, N.d.R.] e il divieto di consumare specifiche parti a rischio di animali con più di 30 mesi di età. Ho anche chiesto l'aiuto di un team internazionale di esperti per valutare la situazione della BSE; in base alle loro raccomandazioni, la USDA ha lanciato un programma di sorveglianza allargata delle popolazioni di bovini ad alto rischio.

KERRY: Le notizie sulla pessima gestione del morbo della mucca pazza da parte della USDA di Bush hanno sottolineato l'esigenza di proteggere i consumatori americani. John Edwards e io miglioreremo la nostra sicurezza alimentare e il processo di controllo, includendovi non solo l'industria della carne, ma anche una più ampia rete di ispezioni per garantire che negli allevamenti non sia violato il divieto del 1997 di alimentare le mandrie con farine animali. Aumenteremo i test e i controlli, e intensificheremo il programma di sorveglianza sulla BSE in modo che tutti gli animali sospetti siano sottoposti ad analisi. E stabiliremo tempi stretti per costruire un sistema di tracciabilità nazionale che faciliterà il compito di individuare gli animali malati e impedire il commercio delle loro carni.

AP Photo/HA/Frank Augstein

15 Molti membri della Camera e del Senato hanno chiesto al presidente di rivedere la politica annunciata il 9 agosto 2001 in materia di ricerca sulle cellule staminali embrionali. Se sarà eletto, cambierà questa politica, e se sì, come?

BUSH: Mi sono impegnato a perseguire la ricerca sulle cellule staminali senza oltrepassare un fondamentale limite morale, e sono il primo presidente che abbia stanziato fondi federali per la ricerca sulle cellule staminali embrionali umane. Tuttavia, la ricerca sulle cellule staminali è a uno stadio molto precoce, e sebbene rappresenti una grande promessa non dovremmo sopravvalutare lo stato delle conoscenze, né politicizzare questi temi, poiché questo dà false speranze ai pazienti che soffrono di terribili malattie e alle loro famiglie. Lo scorso anno, il Governo federale ha investito 25 milioni di dollari nella ricerca sulle cellule staminali embrionali e quasi 191 milioni nella ricerca sulle staminali adulte, fondi corrispondenti ai milioni di dollari investiti dalle aziende private. Inoltre, la mia Amministrazione sta creando una banca nazionale delle cellule staminali embrionali. Questi sforzi stanno dando forte impulso alla ricerca in un nuovo, promettente settore, senza però costituire un finanziamento pubblico che legittimi o incoraggi ulteriori distruzioni di embrioni umani. La mia politica permette ai ricercatori finanziati con denaro pubblico di esplorare il potenziale delle cellule staminali embrionali rispettando le implicazioni etiche e morali associate a questa ricerca.

KERRY: Oggi milioni di bambini e adulti soffrono di malattie incurabili come diabete, Parkinson, Alzheimer, malattie cardiache, cancro e lesioni della colonna vertebrale. John Edwards e io riteniamo che sia nostro dovere eliminare le barriere che ostacolano la scienza e ampliare i confini della ricerca medica in modo che i ricercatori possano trovare tutte le possibili cure. Eliminerò le restrizioni ideologiche alla ricerca sulle staminali imposte dall'Amministrazione Bush, abrogando il divieto di finanziamenti federali alla ricerca su nuove linee di cellule staminali e garantendo al tempo stesso una supervisione etica rigorosa.

Io, Robotico

Per fronteggiare le sfide poste all'umanità dalla rivoluzione robotica serve una «roboetica» che ispiri lo sviluppo e l'impiego delle macchine intelligenti

di Gianmarco Veruggio

Cortesia 20th Century Fox

"Ci sono sempre stati degli *spiriti* nelle macchine. Segmenti di codice casuali riuniti per formare protocolli imprevisti. Del tutto inattesi, questi *radicali liberi* pongono questioni sul libero arbitrio, sulla creatività, e persino sulla natura di quella che potremmo chiamare anima.» Così dice il dottor Alfred Lanning, lo scienziato robotico protagonista del film *Io, Robot*, ispirato ai romanzi di fantascienza di Isaac Asimov, in uscita nelle sale italiane il 29 ottobre. La frase di Lanning si riferisce ai problemi che nascono dall'applicazione al mondo dei robot della ben nota antinomia fra determinismo e casualità, resa possibile dal fatto che i robot sono macchine «intelligenti» e «autonome».

I filosofi cercano da sempre di dare una risposta al dilemma fra libertà e necessità, ma è lecito questo parallelo fra l'uomo e le macchine? Per affrontare il problema occorre anzitutto chiarire che cosa intendiamo per «intelligenza» di una macchina.

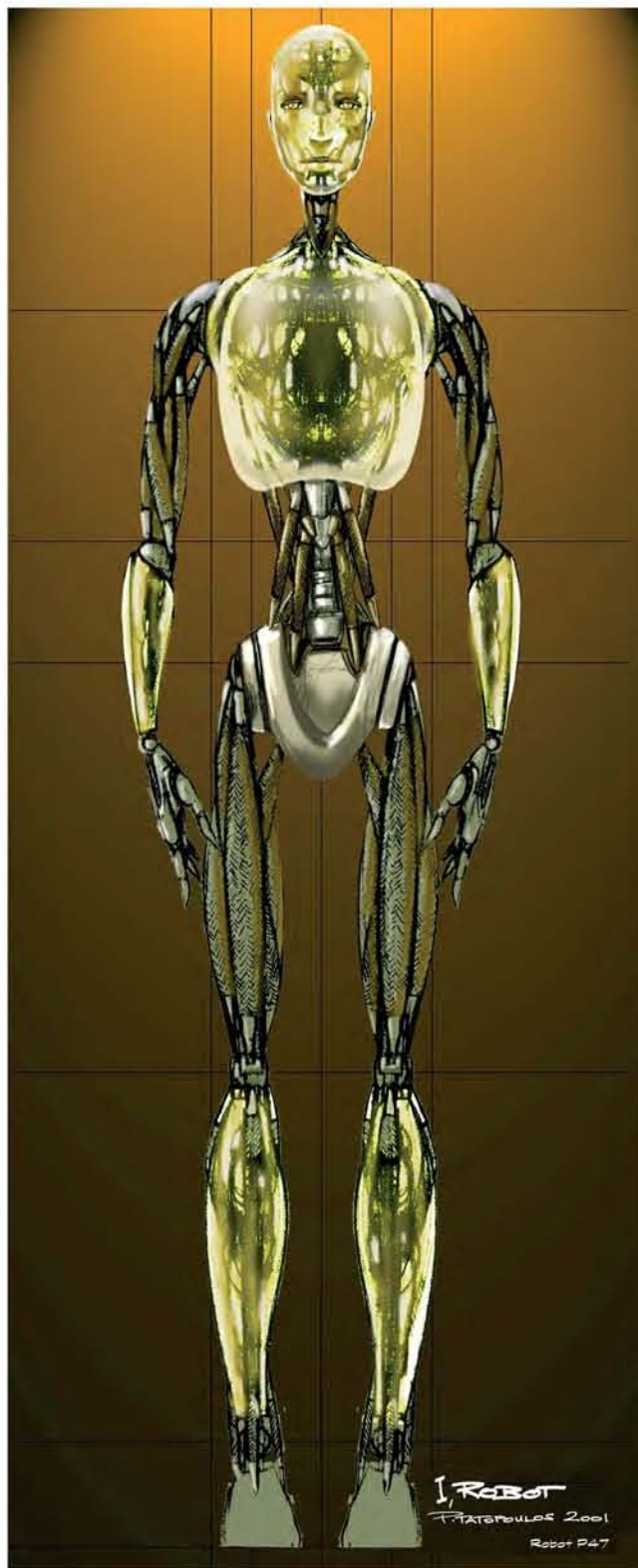
I robot sono dotati di programmi in grado di analizzare e interpretare l'ambiente, e di pianificare strategie e tattiche per svolgere missioni operative: per questo, sono di fatto in grado di «prendere decisioni autonome». Nel caso di robot estremamente sofisticati, impegnati in missioni complesse nel mondo reale, la quantità di alternative possibili da parte del robot è talmente elevata da rendere impossibile alla mente umana abbracciarle tutte a priori, come avviene per esempio nel gioco degli scacchi. Poiché la realtà è infinitamente più complessa della scacchiera, i robot devono elaborare decisioni apparentemente imprevedibili tenendo un comportamento che, visto dall'esterno, può essere assimilato al libero arbitrio.

Da un punto di vista ingegneristico, l'intelligenza è la capacità di una macchina di elaborare le informazioni provenienti dalla percezione sensoriale, interpretarle al fine di elaborare un modello dell'ambiente, pianificare ed eseguire una missione ottenendo un risultato utile all'uomo. Un robot è un sistema complesso, basato su un'architettura di controllo distribuita e dotato di molte delle applicazioni dell'intelligenza artificiale, dalla visione all'interpretazione del linguaggio, dalla rappresentazione della conoscenza alla pianificazione e così via. A questo va aggiunto il concetto di apprendimento: la macchina memorizza quanto interpreta dell'ambiente e le strategie che hanno portato al successo, come pure quelle che, in quell'ambiente, hanno prodotto un insuccesso. Questo progressivo arricchimento del database di informazioni sul mondo e della biblioteca di comportamenti è una forma di addestramento progressivo della macchina a operare in modo autonomo sempre più efficiente. Possiamo chiamare «coscienza robotica» questa conoscenza del mondo e del proprio stato.

Sembrerebbe tutto abbastanza chiaro. Eppure il dottor Lanning si chiede ancora: «Quand'è che uno schema percettivo diventa coscienza? Quand'è che una "macchina alle differenze" diventa la ricerca della verità? Quand'è che una simulazione di personalità diventa il grumo sofferente di un'anima?»

Dalla fantasia alla realtà

Potrebbe sembrare un quesito da romanzo di fantascienza, se non fosse che autorevoli scienziati e filosofi sono d'accordo con il protagonista di *Io, Robot* nel sostenere che i modelli cognitivi un giorno potrebbero evolvere naturalmente fino a riprodurre le funzioni della mente umana. Tuttavia, equiparare l'autonomia di un robot al libero arbitrio, così come ipotizzare un'evoluzione della coscienza della macchina verso un'autocoscienza umana, è arbitrario. Certamente queste macchine potranno svilupparsi in modo autonomo, e anche evolvere, ma il risultato non sarà certo una replica dell'uomo, bensì l'apparire di una molteplicità di intelligenze robotiche diverse, per certi aspetti superiori – e per altri inferiori – a quella umana.

Ma tutto questo appartiene a un lontano futuro e, oggi come oggi, è soltanto il soggetto di opere di fantascienza o l'argomento di dibattiti filosofici e ricerche di laboratorio? Oppure siamo già al punto di doverci preoccupare concretamente di questi problemi?

P. Tatopoulos/cortesia 20th Century Fox

LE TRE LEGGI DELLA ROBOTICA

● **Prima Legge:** Un robot non può arrecare danno a un essere umano né permettere che, a causa del suo mancato intervento, un essere umano venga danneggiato.

● **Seconda Legge:** Un robot deve obbedire agli ordini impartiti da esseri umani, a meno che quegli ordini non siano in contrasto con la Prima Legge.

● **Terza Legge:** Un robot deve difendere la propria esistenza, a meno che questa difesa non sia in contrasto con la Prima o con la Seconda Legge.

Manuale di Robotica, 56' Edizione, 2058 d.C.

C'è anche una **Legge Zero**, che Asimov introdusse successivamente, in *I robot e l'Impero*, e che però fa parte solo della programmazione dei robot più sofisticati:

«Un robot non può danneggiare l'umanità, né può permettere che, a causa del suo mancato intervento, l'umanità venga danneggiata».

Questo condusse a una modifica della Prima Legge, così riformulata:

«Un robot non può arrecare danno a un essere umano né permettere che, a causa del suo mancato intervento, un essere umano venga danneggiato, a meno che questo non sia in contrasto con la Legge Zero.»

Nell'universo di Asimov, le Tre Leggi sono un po' l'equivalente robotico dei Dieci Comandamenti, e rappresentano la base di un'etica così fondamentale che è impossibile costruire un robot che non sia programmato a rispettarle. Ma la paternità delle Leggi non è chiara: la Prima compare solo nella terza storia di robot pubblicata da Asimov, *Bugiardo*, la stessa in cui appare per la prima volta la robopsicologa Susan Calvin (quando le storie furono raccolte nel volume *Io, Robot*, le novelle precedenti vennero aggiornate in modo da includerle). Asimov raccontava che le Leggi gli erano state suggerite da John W. Campbell, direttore della rivista «Astounding Stories», durante una conversazione nel dicembre 1940, ma Campbell diceva di averle prese dalle pagine di Asimov e di averle solo espresse in modo esplicito. Di certo, il primo racconto che le riporta chiaramente è *Circolo vizioso*, pubblicato nel marzo 1942.

Bettmann/Corbis/Contrasto

AMICI O NEMICI? In alto, il bonario Robby the Robot, protagonista di *Il pianeta proibito* (1956). A fronte, un ambiguo automa di *Io, Robot* (2004).

Anche se non è molto appariscente, la rivoluzione robotica è iniziata. Come il secolo scorso è stato il secolo delle macchine e dei calcolatori, questo sarà il secolo dei robot e delle comunicazioni. Dobbiamo quindi prepararci alle profonde modificazioni create dall'ingresso nel nostro spazio vitale di un'infinità di macchine intelligenti di ogni tipo: nelle fabbriche, negli uffici, negli ospedali e nelle case. Vi sarà inoltre una progressiva interconnessione tra i robot e il Web. La presenza delle comunicazioni sarà sempre più pervasiva e noi potremo essere continuamente collegati, mediante unità portatili sempre più integrate nella nostra persona, a persone, servizi, banche dati. A maggior ragione i robot saranno tutti collegati in rete, il che permetterà il loro controllo a distanza e l'aggiornamento e la diagnostica in tempo reale del loro software. Pertanto ogni robot potrà accedere a tutte le risorse presenti sul Web ed essere esso stesso risorsa disponibile, un po' come se in futuro ogni robot potesse chiedere aiuto a ogni altro robot su come affrontare una situazione, un ambiente, un problema.

Lo schema descritto fa prefigurare un'ipotesi per cui non tutta l'intelligenza dei robot risiederà fisicamente sulla macchina, ma vi saranno robot dotati di intelligenza standard e in grado di prelevare dalla rete l'intelligenza e la conoscenza necessarie a svolgere una certa funzione. Questo permette di prevedere schemi di intelligenza distribuita su scala planetaria e di ipotizzare la possibilità dello sviluppo di un'intelligenza robotica collettiva. Ma pone anche interrogativi molto più pragmatici sulla difesa della privacy e, in ultima istanza, della libertà individuale. Si tratta di visioni che, apparentemente fantascientifiche ma in realtà tecnicamente possibili in tempi brevi, fanno capire perché molti si interroghino su quali effetti potranno avere sulla società queste macchine dotate di capacità così impressionanti.

Il primo grande cambiamento sarà dato dalla «rivoluzione robotica» in se stessa. La robotica è una scienza emergente, che sta nascendo dalla fusione di molte discipline tradizionali, appartenenti sia al campo delle scienze naturali che umane. È una *Ge-*

LA «RIBELLIONE DEI ROBOT» E LA NASCITA DELLA ROBOETICA

Nella letteratura e nella fantascienza è ricorrente il mito della creatura che si ribella al proprio creatore umano. Dal *Golem* al mostro di Frankenstein, dai replicanti di Philip Dick fino ai robot di *Terminator* e *Matrix*, gli «schiavi» meccanici tendono a «evolvere» e a rivoltarsi contro il progettista.

Il dibattito sulla «ribellione dei robot» si è acceso recentemente sia a causa del notevole sviluppo della robotica stessa – in particolare nel settore degli umanoidi – sia in seguito ad alcune prese di posizione, vuoi apocalittiche vuoi anticipatrici.

Joseph Rotblat, il noto fisico e premio Nobel quale presidente delle Pugwash Conferences on Science and World Affairs, insieme al rifiuto delle armi nucleari ha espresso in questi anni la sua profonda preoccupazione circa il pericolo rappresentato dall'ingegneria genetica e dai robot. Negli Stati Uniti, il dibattito si è sviluppato dopo l'appello a fermare la robotica dell'*apocalittico* Bill Joy, lanciato su «Wired Magazine» dell'aprile 2000 con l'articolo *Why the future doesn't need us*, cui ha risposto l'*ottimista* Raymond Kurzweil, favorevole allo sviluppo dei robot e delle nanotecnologie.

In Europa, la discussione sull'etica nell'ingegneria delle macchine intelligenti ha avuto un impulso grazie all'impegno congiunto di Paolo Dario, direttore dell'Arts Lab della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, e di José Maria Galván, della Facoltà di teologia della Pontificia Università della Santa Croce di Roma, nella definizione del concetto di «tecnoetica», ovvero «l'insieme di conoscenze che permetta di evidenziare un sistema di riferimento etico che dia ragione della dimensione profonda della tecnologia come elemento centrale del raggiungimento del perfezionamento finalistico dell'uomo».

Nel novembre 2001, in occasione del seminario «Humanoids – A Techno-Ontological Approach» a Tokyo, Galván ha affermato che occorre riscoprire la positività antropologica del termine «artificiale» applicato alla tecnologia, come espressione di libertà. Secondo Galván, l'uomo stesso è un essere artificiale, nella misura in cui è in grado di «farsi», di autocostruirsi con le proprie azioni, nel bene e nel male; proprio per questo la produzione di artifici, dall'artificio tecnico (macchina) all'artificio simbolico (linguaggio), ha un intrinseco valore etico. Rifacendosi agli ingegneri del Rinascimento italiano, Galván propone l'analogia tra tecnica e arte, derivando ambedue dalla stessa radice, *tekné*, e dalla stessa ispirazione creativa.

La nascita della roboetica è dovuta all'iniziativa di Gianmarco Veruggio, autore dell'articolo di queste pagine, che nel gennaio del 2004 ha organizzato il primo Simposio Internazionale sulla Roboetica (http://www.roboethics.org), con l'intento di gettare le basi di un'etica sulla progettazione e l'impiego dei robot. Al convegno hanno partecipato esperti di robotica provenienti da Europa, Stati Uniti e Giappone, ma anche sociologi, filosofi, antropologi e storici. Significativa l'apertura del convegno, con gli interventi dei rappresentanti del Pugwash sulla responsabilità dei fisici nucleari nella realizzazione delle bombe atomiche, e dell'Istituto internazionale di diritto umanitario sugli effetti delle tecnologie belliche sulle popolazioni civili.

Nel corso dei lavori del simposio, l'antropologa svizzera Daniela Cerqui ha identificato due roboetiche, una a breve e una a lungo termine. La prima, dando per scontato che i robot saranno tra di noi, si interroga solo sul *come*, ovvero sulla relazione umani/robot, ponendo domande del tipo «i robot potrebbero farci del male?» e «come possiamo evitarlo?» La seconda invece si chiede i *perché*: «perché progettiamo robot?» e «per quale tipo di società?» E anche «quali valori stiamo cercando di realizzare con le nostre attività?» o «dove potrebbe portarci la ricerca robotica?».

Le posizioni emerse fra i robotici possono essere raggruppate in tre grandi categorie. Gli scienziati del primo gruppo non si sono dimostrati interessati a questioni etiche, considerano la loro attività esclusivamente dal punto di vista tecnico-scientifico e non ritengono di avere responsabilità sociali né morali rispetto ai risultati delle proprie ricerche. Un secondo gruppo corrisponde alla categoria della «roboetica a breve termine», ed esprime giudizi sulla propria attività in termini di *buono* o *cattivo*. Coscienti che i robot potrebbero nuocere agli uomini, questi ricercatori desiderano che le loro macchine intelligenti aiutino e rispettino le persone che andranno ad assistere. Tale categoria considera la roboetica come la deontologia professionale del robotico. Al terzo gruppo appartengono coloro che si interrogano sugli effetti globali dell'invasione robotica rispetto, per esempio, al divario tra Nord e Sud del mondo, alla distanza tra giovani e anziani, allo sviluppo sostenibile, e così via. Questo terzo gruppo esprime una visione *critica* della roboetica, considerandola non come disciplina autoreferenziale, ma come uno strumento per il conseguimento di obiettivi generali. Per approfondire questo approccio, Veruggio ha proposto l'apertura di un ampio dibattito internazionale finalizzato alla stesura di un «Manifesto della roboetica».

In Giappone la questione è seguita con particolare interesse, per la preoccupazione di evitare resistenze al successo commerciale della robotica *consumer*. Per questa ragione, nel febbraio 2004 è stata enunciata la «Fukuoka World Robot Declaration», una dichiarazione sugli intenti benefici dei robot prodotti dall'industria giapponese.

stalt dove il risultato è maggiore della somma delle parti che lo compongono, e dove le singole discipline che si fondono nella robotica vengono modificate prendendo nuovi spunti, nuove prospettive.

In particolare sarà un potentissimo strumento per studiare e comprendere meglio non solo l'universo che ci circonda – lo spazio, gli oceani, il nostro corpo – ma anche la nostra stessa mente. Questo è il motivo per cui la robotica potrà, a mio avviso, condurre a una riunificazione delle «due culture», verso un nuovo umanesimo delle macchine.

Rischi e problemi

Ma potranno sorgere anche molti problemi. Molte funzioni fondamentali saranno affidate ai robot nel campo dei trasporti, della logistica e dell'industria. Sistemi robotici gestiranno la produzione dell'energia, la sicurezza, la protezione dell'ambiente. Questo ci porrà sicuramente in una condizione di crescente dipendenza da queste macchine, analogamente a come oggi dipendiamo dal petrolio e dalle telecomunicazioni. Abbiamo visto che cosa è successo in occasione dei recenti blackout; pensiamo a quali possibili problematiche sorgeranno quando la nostra vita dipenderà dal corretto funzionamento dei robot.

Da un punto di vista sociale, si porrà il problema della sostituzione dell'uomo con una macchina intelligente che svolge il suo lavoro in modo più veloce, preciso ed economico. Il problema, noto dagli albori della rivoluzione industriale, si è già presentato nelle fabbriche, dove gli operai sono stati progressivamente sostituiti dai robot. Si tratta di un problema politico di non facile soluzione, ma che bisogna tenere presente per gestire questa transizione evitando che possa creare problemi sociali. C'è infatti da osservare che se togliere agli esseri umani le incombenze più umili, faticose e pericolose può essere considerato una delle chiavi del progresso della società, è però necessario dar loro la possibilità di sviluppare nel contempo le attività più nobili, che richiedono maggiore creatività e che sono quindi in grado di dargli maggiore soddisfazione.

Nessuna disciplina potrà evitare di fare i conti con l'ingresso dei robot. La giurisprudenza dovrà produrre una legislazione che affronti il problema della responsabilità degli atti commessi dai robot. Occorre infatti osservare che, a differenza degli altri settori in cui il progresso crea «oggetti», critici a seconda dell'uso che ne fa l'uomo, in questo caso il progresso crea «soggetti» autonomi. In medicina vi sarà una ricca casistica di applicazioni, dalla robotica chirurgica alla bionica, in cui ci si dovrà confrontare con le problematiche dell'etica medica e della bioetica.

Si presenterà inoltre in forma nuova il problema già noto della dipendenza dalla tecnologia. Così come si stanno studiando gli effetti delle dipendenze da televisione, videogiochi e Internet, è necessario cominciare a interrogarsi su quali tipi di nuove dipendenze potrebbero svilupparsi verso sistemi robotici avanzati.

UN ROBOT NON PUÒ DANNEGGIARE un essere umano. O invece sì? È quel che devono scoprire la robopsicologa Susan Calvin (Bridget Moynahan) e il detective Spooner (Will Smith) nel film *Io, Robot*. A fronte, il logo disegnato da Emanuele Luzzati per il primo simposio di roboetica.

Cortesia 20th Century Fox

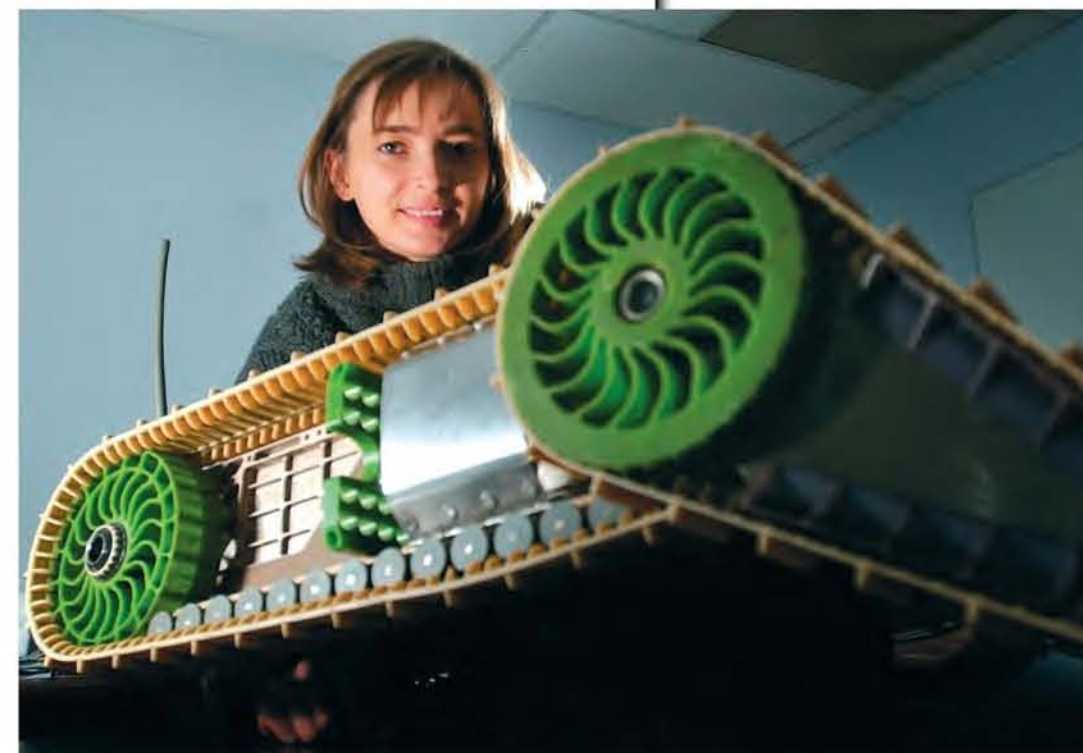
L'INVASIONE DEI ROBOT

Nel mondo vi sono circa 770.000 unità robotiche operanti nel settore dei robot industriali (dati UNECE/IFR, World Robotics Report 2003) – ma gli stock possono superare il milione di unità – di cui 350.000 in Giappone e 233.000 nell'Unione Europea. Stime prudenziali prevedono 875.000 unità installate nel 2005. La densità di robot impiegati nell'industria è di 310 robot ogni 10.000 addetti in Giappone, 135 in Germania, 109 in Italia, 91 in Svezia, tra 50 e 70 in Finlandia, Francia, Spagna e Stati Uniti (tuttavia, i dati giapponesi comprendono tutti i tipi di robot, mentre per gli altri paesi si parla solo di robot *multipurpose*, per cui i dati non sono realmente paragonabili).

Per quanto riguarda i robot di servizio, si prevede che entro il 2006 saranno impiegate 50.000 unità, principalmente a scopo professionale. In campo medico l'invasione sarà guidata da robot per chirurgia, diagnostica e terapia, ma assumerà sempre maggiore importanza il settore delle protesi robotiche. Nel settore ambientale crescerà l'impiego di robot sottomarini (attualmente i più diffusi nel settore professionale col 20 per cento di unità installate sul totale), di sorveglianza, per edilizia, agricoltura, miniere, eccetera. Un settore dove si concentrano enormi investimenti è quello militare, ma, per evidenti ragioni, non vi sono dati ufficiali sul numero di robot prodotti, né su quelli effettivamente operativi.

Molto attivo è anche il settore *consumer*: il Giappone ha investito 40 milioni di dollari soltanto nel Progetto Umanoide 1999-2003 che ha stimolato la ricerca in moltissimi laboratori universitari e industriali. Il risultato di questo sforzo è impressionante: decine di prototipi, e autentiche star robotiche prossime al lancio sul mercato come Asimo della Honda, QRIO della Sony, HRP-2P della Kawada e l'imminente Toyota Partner Robot. Fra pochi anni, in ogni casa vi saranno robot per aiutare nelle faccende domestiche, assistere anziani e malati, accudire i giardini, proteggere le abitazioni, giocare con i nostri figli. Per esempio, alla fine del 2002 erano stati venduti più di 50.000 aspirapolvere/tagliaerba robotici e si prevede che alla fine del 2006 il dato sarà decuplicato.

Ultimo, ma forse primo per importanza commerciale, è il settore dei robot per *entertainment/edutainment*, il cui mercato sta esplodendo. Basti pensare che di Aibo, il cagnolino-robot della Sony, sono già stati venduti oltre 130.000 esemplari.

AP Photo

ROBOT DI PACE E DI GUERRA. Helen Greiner, presidente e cofondatrice di IRobot, un'azienda americana che produce i PackBot, piccoli robot per uso militare che sono stati già utilizzati in Afghanistan per missioni di ricognizione alla ricerca di esplosivi e armi chimiche. In basso, Gianmarco Veruggio accanto al robot sottomarino Romeo. Nella pagina a fronte, robot chirurghi in sala operatoria (*a sinistra*) e una linea robotizzata di produzione automobilistica (*a destra*).

Pascal Goetgheluck/SPL/Grazia Neri

Maximilian Stock Ltd/SPL/Grazia Neri

Pensiamo al caso di un umanoide – fisicamente abbastanza simile a un essere umano – utilizzato in casa come aiuto, assistenza, compagnia. Questa macchina, sicuramente progettata per essere bella e simpatica, svolgerà una serie di funzioni utili sollevandoci da tanti problemi. Sarà gradevole, veloce, infaticabile, risponderà infallibilmente a ogni nostra domanda perché potrà collegarsi alle banche dati mondiali. Ci apparirà pertanto come una specie di genio della lampada al nostro servizio. A mano a mano che ci abitueremo a questo tipo di compagno, è inevitabile che si possa creare un *transfert* e forse una *dipendenza psicologica* da questa macchina, con il rischio di attribuirle caratteristiche umane, sviluppando nei suoi confronti sentimenti umani di odio o amore.

Ma questo meraviglioso automa rimane una macchina. Che si può rompere, che può essere sostituita da un'altra macchina, che può «tradirci» quando un *bug* nel suo sistema operativo le fa fare qualche cosa di sbagliato o potenzialmente dannoso nei nostri confronti.

Vi è infine un settore molto delicato, in cui la tecnologia è progettata apposta per essere dannosa, ed è il settore degli armamenti. Non è un segreto per nessuno che gran parte della ricerca robotica statunitense è finanziata dalla Difesa e che vi sono molti progetti avanzati per la costruzione di macchine intelligenti da impiegare in guerra al posto degli esseri umani. Anche se questo viene presentato come un vantaggio poiché permetterebbe di ridurre le perdite di vite umane, è bene chiedersi contro chi andranno a combattere questi robot e perché. Inoltre la disponibilità di questi micidiali combattenti disumani e l'illusione che tutto si riduca a un videogioco rischia di generare una nuova escalation in grado di mettere in pericolo il futuro dell'umanità, non ancora uscita dall'incubo di conflitti ABC (atomico, batteriologico, chimico).

Tre leggi non bastano

Prevedendo questi scenari, nel 1942 Isaac Asimov formulò le «Tre leggi della robotica» (*si veda la finestra a p. 43*), che, cablate in modo irreversibile nel «cervello positronico» dei suoi robot, imponevano a questi di essere al servizio del benessere degli uomini e impedivano loro di fare del male. È adeguata la soluzione ipotizzata da Asimov? Bastano le tre leggi per rendere sicuri i robot? La soluzione sarà produrre robot «3 Laws Safe», come quelli del dottor Lanning di *Io, Robot*? La risposta è no.

Certamente, dovremo rendere queste macchine il più possibile sicure, come peraltro nell'ambito della tecnologia moderna viene fatto per ogni tipo di macchina, ma sarà comunque impossibile implementare le tre leggi in modo infallibile all'interno dei robot. Infatti, il rispetto delle tre leggi presuppone una capacità di analisi della realtà e delle conseguenze di ogni azione talmente complessa da superare le capacità anche della più sofisticata intelligenza artificiale immaginabile.

Ma, anche nel caso che questo fosse possibile, resterebbe il problema, forse ancora più grave, di garantire l'implementazione delle tre leggi all'interno di tutti i robot prodotti, il che non è storicamente realistico. Ecco perché la precondizione per arrivare a un'etica artificiale da implementare nei robot è lo sviluppo di un'etica umana relativa alla robotica: ovvero la «roboetica».

La responsabilità principale di questa impresa ricade ovviamente sugli scienziati robotici (come è stata responsabilità dei fisici iniziare il dibattito sull'uso pacifico dell'energia nucleare e dei medici e dei biologi fronteggiare le molteplici tematiche della bioetica). Questo è particolarmente importante per prevenire paure irrazionali che possono deviare l'attenzione dai problemi reali e, in ultima analisi, produrre atteggiamenti di rifiuto di una tecnologia che invece può essere strumento di sviluppo economico e di progresso sociale. In questo sforzo è fondamentale il contributo di esperti provenienti da tutti i settori delle scienze naturali e umane.

In ogni caso, noi robotici dobbiamo assicurare il nostro impegno per aumentare la consapevolezza del pubblico circa le problematiche della robotica, affinché la società possa prendere parte attiva nel processo di creazione di una coscienza collettiva, in grado di individuare e prevenire un uso errato della tecnologia.

La speranza è che si possa giungere a un'etica condivisa da tutte le culture, tutte le nazioni e tutte le religioni, in base alla quale la costruzione e l'impiego di macchine intelligenti contro gli esseri umani sia considerato un crimine contro l'umanità.

L'AUTORE

GIANMARCO VERUGGIO è ricercatore robotico sperimentale. Ingegnere elettronico sistemista, ha svolto ricerche in numerosi settori dell'informatica e dell'automatica e ha fondato nel 1989 il CNR-Robotlab di Genova. Ha sperimentato i suoi prototipi in numerose missioni per l'esplorazione degli oceani, e Romeo è il primo robot sottomarino a essere stato pilotato via Internet sia in Antartide che in Artico. È presidente dell'associazione culturale Scuola di Robotica per la promozione di questa scienza tra i giovani.

Cortesia Gianmarco Veruggio

PER APPROFONDIRE

BROOKS R. A., *Flesh and Machines*, Pantheon Books, 2002.

GALVÁN, J. M., *La nascita della tecnoetica*, in «Sant'Anna News» n. 18, pp. 12-15, 2001.

TAGLIASCO V., *Dizionario degli esseri umani fantastici e artificiali*, Mondadori, 1999.

SOMENZI V., CORDESCHI R. (*a cura*), *La filosofia degli automi. Origini dell'intelligenza artificiale*, Bollati Boringhieri, 1986.

La vita altrove

Dai canali marziani alle trasferte di Pulcinella sulla Luna, fino alle moderne sonde spaziali, ecco com'è cambiato il nostro modo di immaginare e cercare esseri viventi sugli altri pianeti

di Giovanni Fabrizio Bignami

La ricerca di vita extraterrestre è un argomento difficile quanto affascinante, intorno al quale le nostre convinzioni attuali sono radicalmente diverse da quelle dei nostri padri, per non parlare dei nostri antenati. Una ricostruzione storica sul tema può iniziare, per esempio, con la grande «bufala» lunare perpetrata dal «New York Sun» nel 1835. Il «Sun» era un'importante testata di New York che in quegli anni tirava poco più di 10.000 copie. Per farsi pubblicità, un suo redattore pensò di sfruttare il fatto che Sir John Herschel – figlio di William Herschel e, come il padre, famosissimo astronomo – aveva costruito in Sudafrica il più grande telescopio dell'epoca. Vista la difficoltà di comunicazioni con il Sudafrica, il giornale pubblicò a puntate una serie di immagini del tutto false, dicendo che erano state ottenute osservando la Luna con l'eccezionale telescopio di Herschel.

Si trattava di visioni di esseri alati che volano su ameni paesaggi lunari, con laghi, templi e animali fantastici. La gente fece la fila per accaparrarsi le copie del giornale, che diventò rapidamente il più letto del mondo, raggiungendo una diffusione di 19.360 copie: più del «Times» di Londra. Dopo settimane di successo strepitoso, tuttavia, il giornalista, obbligato a porre fine alla storia prima di ricevere qualche imbarazzante smentita, immaginò che Herschel avesse dimenticato aperto il telescopio durante il giorno e che il Sole lo avesse bruciato, distruggendo questa splendida macchina e impedendo il ripetersi delle osservazioni. John Herschel, naturalmente, era all'oscuro di tutto.

Pulcinella sulla Luna

Nel frattempo, la notizia aveva comunque fatto il giro del mondo e una traduzione della storia venne stampata a Napoli nel 1836. La curiosità suscitata da *li lunatece* fu tale da spingere l'immortale Pulcinella a organizzare un viaggio sulla Luna, perché: «S'io no lo bbevo/S'io non lo ttocco/Io no lo ccredo/Non mme lo mmocco».

Come pensa Pulcinella di arrivare sulla Luna? Facilissimo: si prendono due catene, si attaccano da una parte al Molo Beverello, dall'altra parte alla Luna, si prende una barca con ruote dentate che si incastrano negli anelli delle catene, una vela per la propulsione e, se manca il vento, c'è, eventualmente, un soffietto. Ma la stampa del 1836 che immortala la partenza di Pulcinella contiene anche un interessante riquadro. In esso si vede il famoso telescopio di Sir John Herschel che guarda gli abitanti della Luna, i quali, a loro volta, hanno messo insieme un telescopio formidabile che guarda il telescopio di Herschel: perché *li lunatece* non sono da meno dei terrestri.

Abbiamo anche la stampa di Pulcinella di ritorno sulla Terra con la sua barca con le catene arrotolate. Brindando, il nostro spiega: «Mirabbilia aggio visto e aggio toccato/Ercel le scoperte toje frietelle/Io cchiù sfunno de te songo arrivato/E aggio visto cose strane e belle/N faccia a sta vela videle pittate». E sulla vela vediamo infatti il bestiario scoperto da Pulcinella sulla Luna.

IL SUCCESSO DELLA BUFALA LUNARE del «New York Sun» e il viaggio di Pulcinella sulla Luna che essa ispirò nella prima metà dell'Ottocento testimoniano il grande fascino che l'ipotesi di forme di vita extraterrestri ha da tempo sull'umanità. In alto, uno dei «panorami lunari» descritti dal quotidiano americano e ripresi nella versione napoletana. A fronte, le due stampe che immortalano la partenza e il ritorno di Pulcinella dalla Luna.

IN SINTESI

- Negli ultimi 150 anni, le convinzioni sull'esistenza di vita in altri pianeti sono radicalmente mutate. Dai titoli del «New York Times» sulle imprese tecnologiche dei «nostri vicini marziani» si è passati a un più sano scetticismo scientifico.
- Oggi la ricerca di vita extraterrestre è un impegno concreto, che coinvolge scienziati e agenzie spaziali di ogni parte del mondo, e ha stimolato, per esempio, l'invio di sonde su Marte.
- Particolarmente promettente è la ricerca di pianeti extrasolari, che in nove anni ha già dato risultati straordinari, portando alla scoperta di interi sistemi planetari. Inoltre, vi sono i programmi di «ascolto» come il SETI e il lancio di messaggi con le sonde Pioneer e Voyager.

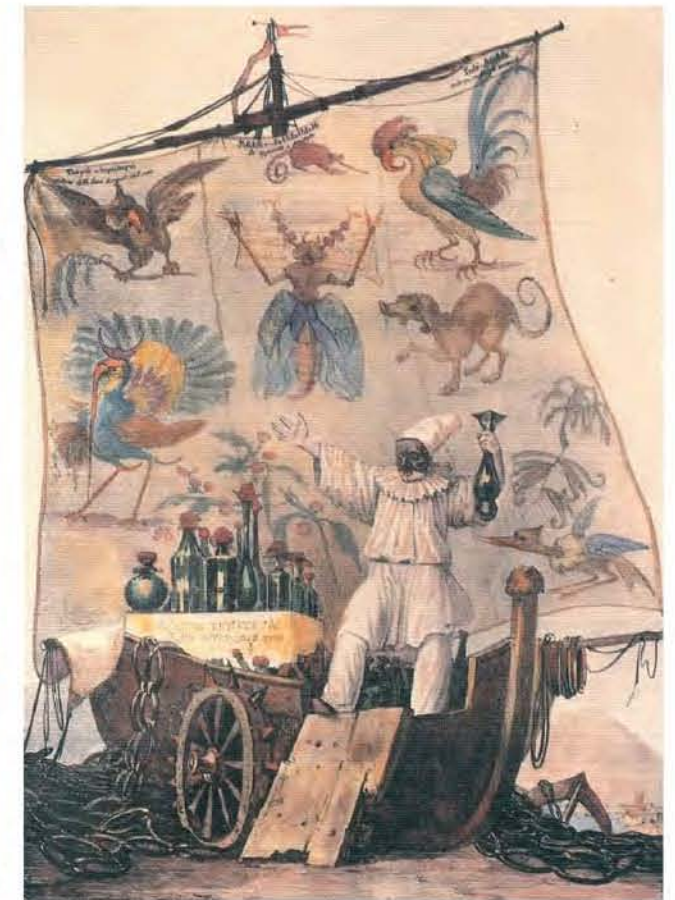
L'AUTORE

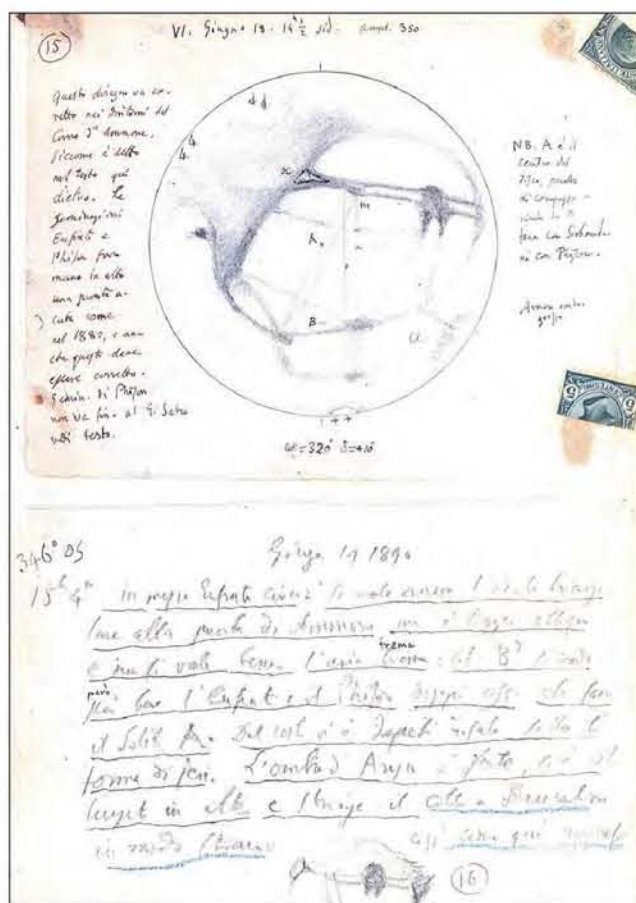
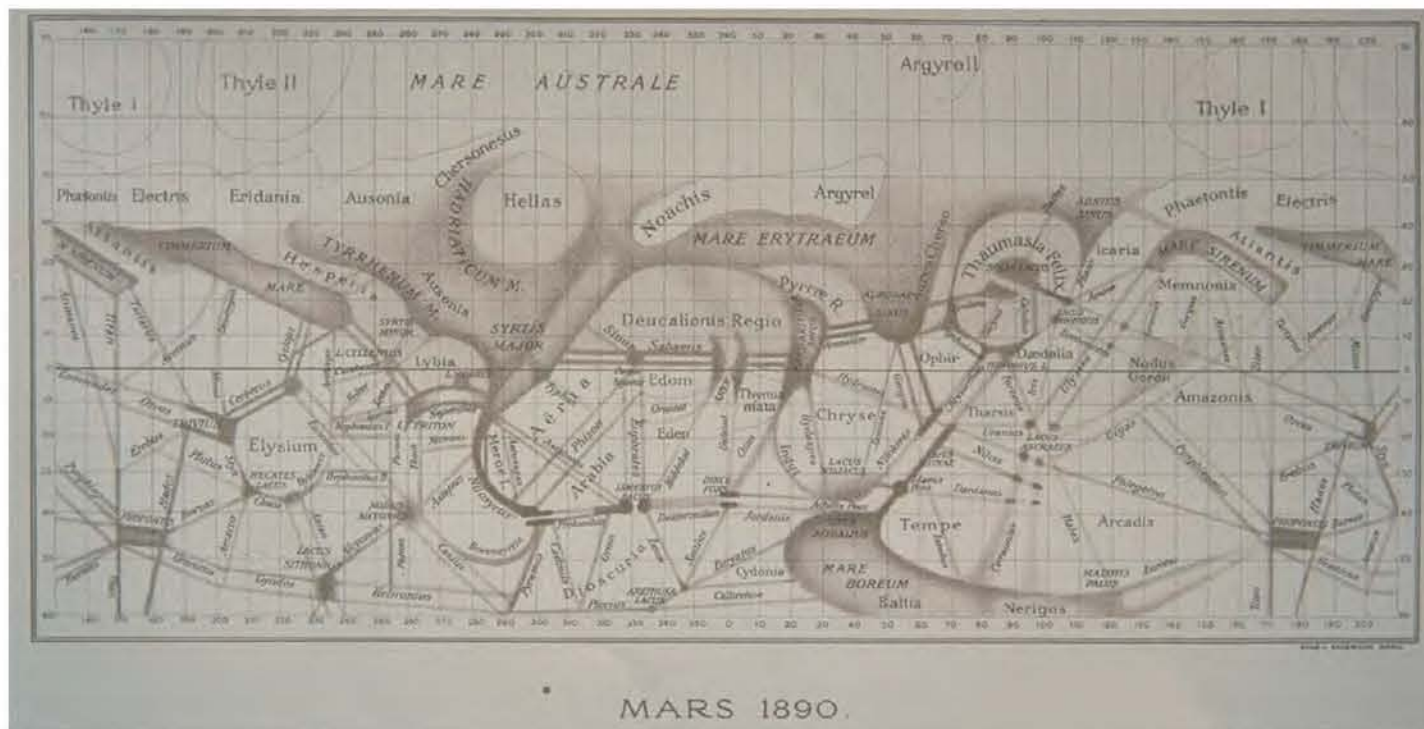
GIOVANNI F. BIGNAMI insegna astronomia all'Università di Pavia ed è Accademico dei Lincei. È stato direttore scientifico dell'ASI fino al 2002 e oggi dirige il CESR di Tolosa. Questo articolo è tratto da una conferenza tenuta all'Accademia dei Lincei ed è in corso di stampa nel fascicolo n. 3, 2004, dei «Rendiconti Lincei: Scienze Fisiche e Naturali».

Pochi anni dopo, sempre a Napoli, il direttore dell'Osservatorio, Capocci, scrisse un libretto poco noto, intitolato *Relazione del primo viaggio dalla Luna fatto da una donna nell'anno di grazia 2057*. Il volume è del 1857, quindi Capocci dà alla tecnologia due secoli di tempo per svilupparsi; ma è importante notare che ci vorranno ancora sette anni prima che Jules Verne pubblichi il suo *De la Terre à la Lune*, che quindi ha un immediato precursore napoletano, anche se poco noto al mondo.

Sulla Luna, insomma, c'è una civiltà, ci sono degli abitanti, c'è un fervore di opere e di idee. Del resto, Flammarion – grande scienziato e divulgatore francese – alcuni anni dopo propose uno splendido argomento filosofico, detto del *Poisson Raisonneur*. «Chi si basa sulle differenze tra la Terra e la Luna – osservava Flammarion – per negare ogni possibilità di esistenza di forme viventi lunari fa lo stesso ragionamento di un ipotetico pesce pensante, convinto che l'acqua sia l'unico elemento nel quale è possibile la vita e che quindi nessun essere vivente possa esistere al di fuori di essa.»

Gli straordinari ingegneri marziani

Torniamo all'astronomia con Giovanni Virgilio Schiaparelli, socio dell'Accademia dei Lincei e unico italiano mai insignito (nel 1902) della Bruce Medal, il riconoscimento più importante della American Astronomical Society. Schiaparelli era direttore dell'Osservatorio di Brera, a Milano, dove, a partire dal 1877, iniziò una serie di osservazioni di Marte con uno dei migliori telescopi dell'epoca. Notte dopo notte, Schiaparelli osserva, prende appunti e disegna ciò che è convinto di vedere su Marte. Da questi schizzi, costruisce splendide mappe della superficie del Pianeta Rosso, mappe che vengono pubblicate, con lunghi commenti in italiano, nei «Rendiconti» dell'Accademia dei Lincei. Le mappe di Schiaparelli sono caratterizzate da linee diritte, che l'astronomo identifica spesso con nomi di fiumi, e che chiama genericamente canali. Percival Lowell, un milionario americano con la passione per l'astronomia, legge «canali» e traduce *canals* (che possono essere solo artificiali) invece di *channels* (termine più generico che comprenderebbe anche canali naturali). Da questo errore di traduzione nasce l'epopea dei marziani che continua fino al giorno d'oggi.

Per osservare Marte, Lowell fa costruire in Arizona il Lowell Observatory, ancora in funzione. Il risultato delle sue osservazioni è un mappamondo di Marte, ricoperto da una fitta rete di canali drittissimi che si incrociano in punti che ricordano molto delle città. Lowell è sicuro che su Marte prosperi una civiltà altamente tecnologica. Il 27 agosto 1911 il «New York Times» gli dedica un'intera pagina che intitola *Martians build two immense canals in two years* («I Marziani costruiscono due immensi canali in due anni»). Confrontando osservazioni prese a due anni di distanza, il quotidiano annuncia che *Vast engineering works accomplished in an incredibly short time by our planetary neighbours!* («I nostri vicini planetari hanno realizzato gigantesche opere d'ingegneria in un batter d'occhio!») In altre parole, nel 1911 tutti erano convinti non solo che ci fosse vita su Marte, non solo che fosse vita intelligente, ma che si sapessero fare canali di migliaia di chilometri nel giro di due anni. Purtroppo, non tutti riuscivano a vedere i canali: Antoniadi, un astronomo francese di origine greca, vedeva forme più sfumate che non avevano nulla a che fare con le righe diritte di Lowell.

C'è voluto molto tempo per riuscire a capire quale fosse la realtà: bisogna aspettare fino al 1966 perché il grande planetologo americano Carl Sagan, sulla base delle foto inviate dalla

L'EQUIVOCO DEI CANALI. A scatenare la saga dei marziani e delle loro tecnologie evolute fu un errore del milionario americano Percival Lowell nel tradurre la parola «canali» dalle mappe di Marte realizzate da Schiaparelli. Qui sopra, una pagina degli appunti di Schiaparelli, conservata negli archivi dell'Osservatorio di Brera; in alto, una stampa di una delle sue mappe. Nella pagina a fronte, la rete dei canali secondo Lowell.

sonda Mariner 4, scriva su «Nature» che i canali di Marte sono «un problema psicofisiologico e non astronomico». Basandosi sulle immagini della sonda, Sagan e il collega Pollack propongono invece che i canali di Marte siano sistemi di creste montuose analoghi a quelli che si trovano sul fondo degli oceani terrestri. Un'interpretazione ancora fantasiosa, ma già più vicina alla realtà geologica del pianeta.

A caccia dell'acqua marziana

Oggi, grazie ai dati di numerose sonde, cominciamo ad avere un'idea del ruolo dell'acqua nell'evoluzione del Pianeta Rosso. Le rivelazioni altimetriche della sonda Mars Global Surveyor mostrano che un emisfero è, in generale, a quota inferiore dell'altro e, soprattutto, ha molti meno crateri. È ragionevole supporre che l'emisfero più basso fosse ricoperto da un grande oceano, la cui acqua potrebbe essere evaporata oppure filtrata nel sottosuolo. Lo spettrometro a bordo della sonda orbitante Mars Odyssey rivela ora indubbiamente la presenza di acqua, in percentuale inferiore a quella sulla Terra, ma pur sempre significativa.

Questo però non significa che su Marte siano esistite forme di vita, come ha suggerito nel 1996, in base all'esame di un meteorite marziano trovato in Antartide, una NASA in cerca di finanziamenti. I risultati dell'analisi del meteorite sono molto discutibili, poiché è probabile che le forme osservate siano composizioni inorganiche che non hanno nulla a che fare con lo sviluppo della vita. Tuttavia bisogna notare il radicale cambiamento della nostra attitudine verso l'esistenza di vita su altri pianeti: siamo sempre meno disposti ad accettare la possibilità che ci sia, o ci sia stata, vita su Marte.

Vorrei fare un paragone con la reazione dell'Europa alla scoperta di vita «intelligente» nelle Indie Occidentali. Quando Colombo riportò dall'America alcuni indigeni, si pose un problema drammatico: di quale forma di vita si trattava? Furono proposte diverse soluzioni: poteva trattarsi di pre-adamiti, cioè individui che si trovavano in quella parte della Terra da prima di Adamo. Oppure potevano essere co-adamiti, nati insieme con Adamo. Ma, in questo caso, come avevano fatto ad arrivare fino là? Infine, potevano essere non adamiti, indipendenti dalla stirpe di Adamo: era l'idea di Giordano Bruno, che però non piacque all'Inquisizione.

Se trovassimo le prove dell'esistenza di vita extraterrestre saremmo nella stessa situazione. E subiremmo un nuovo colpo all'orgoglio del genere umano: il quarto, dopo che Copernico e Galileo ci hanno dimostrato che non siamo al centro dell'Universo, Darwin ci ha detto che siamo solo una particolare specie di scimmie, e lo Hubble Space Telescope e altre ricerche moderne in cosmologia ci hanno dimostrato che la materia della quale siamo fatti noi e tutto quello che vediamo è soltanto il quattro per cento di tutta la materia dell'universo. Oggi, cominciamo a chiederci addirittura se l'inizio dell'evoluzione di Darwin non sia per caso legato alle stelle: ci domandiamo, insomma, se i marziani siamo noi. E potrebbe essere anche per questo che abbiamo deciso di andare su Marte con la sonda europea Mars Express e con i robot americani Spirit e Opportunity.

Se la ricerca di acqua è ancora il primo passo per la ricerca della vita, le analisi più accurate sono state finora fatte nel 1976 dal Viking, una splendida missione che ha scavato la sabbia di Marte alla ricerca di materiale prebiotico. I risultati non sono, purtroppo, del tutto chiari, ma occorre sottolineare che il Viking ha studiato pochi centimetri di superficie marziana. E anche sulla Terra ci sono luoghi all'apparenza assolutamente inadatti allo sviluppo prebiotico. In un recente lavoro pubblicato su «Science», Navarro-Gonzalez e colleghi hanno studiato del terreno prelevato in Cile, nel deserto di Atacama, uno dei luoghi più aridi della Terra, dimostrando che è inadatto a far crescere qualsiasi tipo di coltura biologica. Nell'improbabile caso che un Viking marziano fosse atterrato nel deserto di Atacama, sarebbe stato immediato concludere che sulla Terra non esiste alcuna forma di vita, men che meno intelligente.

L'EQUAZIONE DI DRAKE

$$N = R^* \times Fp \times Ne \times Fl \times Fi \times Fc \times L$$

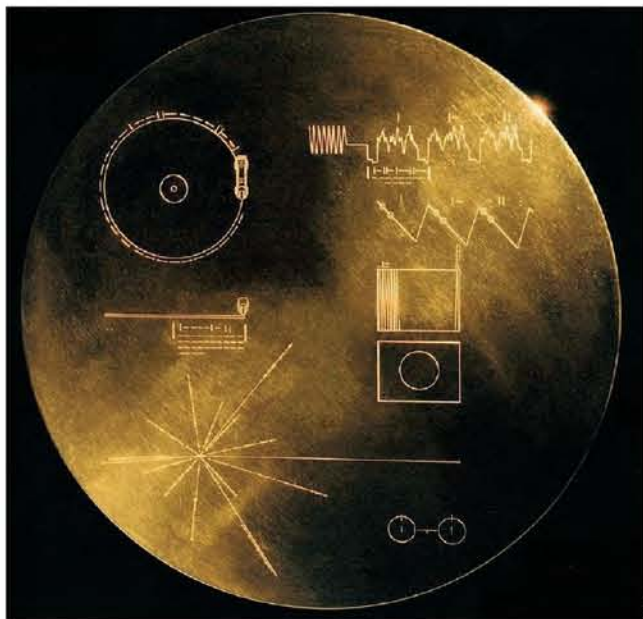
- **N** = il numero di civiltà nella galassia in grado di inviare segnali radio
- **R*** = il tasso di formazione delle stelle nella nostra galassia
- **Fp** = la percentuale di queste stelle con un sistema planetario
- **Ne** = la percentuale di questi pianeti potenzialmente in grado di ospitare la vita
- **Fl** = la percentuale di questi pianeti in cui la vita si è sviluppata
- **Fi** = la percentuale di questi pianeti in cui si è sviluppata vita intelligente
- **Fc** = la percentuale di civiltà in grado di inviare segnali radio nello spazio, e che desiderano farlo
- **L** = la durata media della vita di queste civiltà

Ma c'è vita sulla Terra?

Poniamoci ora una domanda più provocatoria: esiste la vita sulla Terra? Carl Sagan ha cercato di rispondere utilizzando la stessa metodologia applicata alla ricerca di vita sugli altri pianeti. Sfruttando il passaggio ravvicinato alla Terra effettuato dalla sonda Galileo in viaggio verso Giove, ha chiesto di accendere gli strumenti che, poi, avrebbero cercato la vita su Giove. I risultati sono stati sconcertanti: Galileo ha sorvolato molto rapidamente l'Australia e l'Antartide, facendo una serie di foto, anche ad alta risoluzione, e il suo esame dei deserti dell'Australia e delle distese gelate dell'Antartide non mostra nessuna evidenza di opere umane. Altri strumenti rivelano però una grandissima abbondanza di metano, e questo testimonia almeno la presenza di qualche forma di vita vegetale. La prova dell'esistenza di vita intelligente è allora la cosiddetta «bolla di Marconi», cioè la presenza di un'emissione radio non riconducibile a cause naturali e che si espande alla velocità della luce, dimostrando l'esistenza di una civiltà tecnologicamente avanzata, se non proprio intelligente. Quella che circonda la Terra ha ormai un raggio di diverse decine di anni luce, e comprende, perciò, migliaia di stelle.

La ricerca di vita extraterrestre, ovviamente, non si ferma al sistema solare. La probabilità di trovarla viene riassunta nella cosiddetta equazione di Drake, formulata dall'astronomo Frank Drake negli anni sessanta, con la quale si può calcolare il numero di civiltà esistenti nella nostra galassia che sarebbero in grado di mettersi in contatto con noi. Se infatti non possiamo sperare di viaggiare al di fuori del sistema solare, possiamo però immaginare di ascoltare un'altra civiltà intelligente sviluppatasi nella Via Lattea, che ci mandi dei segnali. Per calcolare la probabilità che ciò avvenga bisogna moltiplicare tra loro una serie di fattori (*si veda la finestra qui a fianco*), ma è chiaro che troppi dei termini dell'equazione sono pochissimo, o per nulla, noti. L'equazione serve quindi a riassumere il problema, ma non dà, in realtà, un grande aiuto per stabilire quantitativamente le probabilità di entrare in contatto con una civiltà extraterrestre.

Altre Terre, altri Soli

Un modo certamente corretto per procedere in questo senso è la ricerca dei pianeti extrasolari, il primo dei quali è stato scoperto dagli astronomi europei Mayor e Queloz nel 1995 nella costellazione di Pegaso. Il metodo di ricerca è delicato, e sfrutta una tecnica che permette di vedere se una stella risulti leggermente perturbata dal moto di una massa che le gira intorno. Si tratta di una metodologia che funziona bene per individuare pianeti molto massicci e molto vicini alla loro stella, quindi pianeti simili a Giove che ruotino intorno alla stella a una distanza inferiore a quella che separa Mercurio dal Sole, vale a dire per nulla adatti allo sviluppo della vita. A nove anni dalla scoperta del primo pianeta al di fuori del nostro sistema solare, oggi ne conosciamo 140, distribuiti in più di cento sistemi planetari, alcuni dei quali contengono più di un pianeta. La scoperta di un pianeta di tipo terrestre non è lontana.

PER APPROFONDIRE

LINEWEAVER C. H., FENNER Y. e GIBSON B. K., *The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way*, in «Science», Vol. 303, pp. 59-62, 2 gennaio 2004.

NAVARRO-GONZALEZ R. e altri, *Mars-like soils in the Atacama desert, Chile, and the dry limit to microbial life*, in «Science», Vol. 302, pp. 1018-1021, 7 novembre 2003.

MAYOR M. e QUELOZ D., *A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star*, in «Nature», Vol. 378, pp. 355-357, 23 novembre 1995.

SAGAN C. e altri, *A search for life on Earth from the Galileo spacecraft*, in «Nature», Vol. 365, pp. 715-721, 21 ottobre 1993.

SAGAN C. e POLLACK J. B., *On the nature of the canals on Mars*, in «Nature», Vol. 212, pp. 117-121, 8 ottobre 1966.

NASA

IL DISCO DORATO TRASPORTATO DALLE DUE SONDE VOYAGER contiene diverse informazioni destinate a illustrare la vita sulla Terra a un'eventuale civiltà aliena, tra cui 115 immagini, una selezione di suoni naturali, musiche di varie epoche e civiltà e un messaggio di saluto in 55 lingue diverse. Sulla superficie del disco sono incise le istruzioni per vedere e ascoltare le informazioni che contiene.

NASA/JPL

L'OMBRA DI SPIRIT, uno dei due robot inviati dalla Nasa su Marte, si staglia sul suolo del cratere Gusev, puntando verso un rilievo battezzato «Columbia Hills» dai responsabili della missione.

È anche possibile affrontare il problema da altri punti di vista: poiché la ricerca diretta di pianeti extrasolari ci conduce verso oggetti troppo massicci e troppo vicini alla stella madre, possiamo cercare delle *hab-stars*, delle «stelle abitabili», cioè astri che abbiano un'età abbastanza elevata, che non siano troppo variabili, e che siano in grado di sostenere pianeti di tipo terrestre, mantenendovi l'acqua in forma liquida per qualche miliardo di anni: vale a dire, il tempo che è stato necessario per lo sviluppo della vita sulla Terra.

Sorprendentemente, le stelle che rispondono a questi requisiti non sono pochissime. Grazie all'esperimento spaziale europeo Hipparcos, recentemente ne sono state trovate ben 17.129 a meno di 500 anni luce da noi, praticamente nel nostro vicinato galattico. Ci sono quindi oltre 17.000 stelle su cui puntare le nostre antenne, nell'attesa (e nella speranza) di un segnale. Generalizzando il concetto, circa il 10 per cento delle stelle della nostra galassia può essere adatto allo sviluppo di materiale prebiotico, e queste stelle, in funzione dell'età dell'universo, sono contenute nelle zone un po' periferiche della Via Lattea, più o meno dove ci troviamo anche noi. Poiché la nostra galassia contiene 200 miliardi di stelle, le opportunità di ricerca non mancano.

Ma che cosa dobbiamo cercare? Dobbiamo andare a caccia di condizioni simili a quelle terrestri oppure di condizioni diverse? Il nostro sistema solare ci offre un interessante esempio in Europa, uno dei quattro satelliti di Giove scoperti da Galileo Galilei nel 1610. Europa è coperto di ghiaccio d'acqua, e la sua superficie, fotografata dalla sonda Galileo, somiglia al pack artico, a riprova che il ghiaccio sta, probabilmente, galleggiando su un oceano di acqua mantenuta liquida dallo strato gelido che la protegge dal freddo del cosmo. Si tratta di condizioni molto diverse da quelle terrestri, certo, ma potenzialmente adatte allo sviluppo della vita. Di conseguenza, bisogna evitare di avere preconcetti sul tipo di condizioni ambientali da cercare, senza smettere di ascoltare, come fa l'istituto SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence), le stelle che abbiamo selezionato o la parte della galassia dove esse sono maggiormente concentrate.

Nel frattempo, abbiamo avuto, e abbiamo, anche un ruolo attivo. La Terra ha inviato dei messaggeri nel cosmo: si tratta delle sonde Pioneer 10 e Pioneer 11 e dei due satelliti Voyager, lanciati più di un quarto di secolo fa. Quattro oggetti costruiti dall'uomo che sono ormai arrivati ai confini del sistema solare, e stanno uscendo dalla zona di influenza del Sole per entrare nel mezzo interstellare. A loro abbiamo affidato dei messaggi importanti: a bordo dei Pioneer c'è una placca, ideata da Carl Sagan perché fosse comprensibile per una civiltà extraterrestre, su cui sono incisi uno schizzo del sistema solare con la traiettoria del satellite, la posizione del Sole relativa a 14 pulsar (si tratta di un modo estremamente preciso per fornire la nostra posizione astronomica), le sagome di un uomo e di una donna accanto al satellite (per dare un'idea delle dimensioni relative) e un codice binario. I Voyager, più recenti, portano invece qualcosa di molto più elaborato: un disco fonografico dorato che, oltre a recare incisi la posizione del Sole e lo schema dell'atomo di idrogeno, contiene suoni e immagini destinati a illustrare il nostro pianeta e i suoi abitanti.

Non ci resta che aspettare, sperando che chi lo trova riesca a capire come è fatta la vita sulla Terra: e abbia poi voglia di comunicare con noi.

Evo-Devo alle frontiere del pensiero biologico

Dall'integrazione tra biologia dello sviluppo e biologia evoluzionistica emerge un nuovo paradigma per comprendere la vita

di Carlo Alberto Redi, Maurizio Zuccotti e Silvia Garagna

Un famoso detto di Theodor Dobzhansky afferma che «niente in biologia ha un senso se non nella prospettiva evolutiva». Peter Brian Medawar, Nobel per la medicina nel 1960, sostenne che «per un biologo l'alternativa a non pensare in termini evolutivi è non pensare del tutto». Alla luce delle attuali conoscenze biologiche, Gabriel Dover dice ora che «niente in evoluzione ha un senso se non nella prospettiva della biologia dello sviluppo e dello studio del genoma». I risultati dei progetti di sequenziamento di vari genomi hanno infatti prodotto cambiamenti nei paradigmi concettuali che impieghiamo per spiegare la complessità del vivente ai diversi livelli organizzativi e funzionali.

IL MOSCERINO DELLA FRUTTA (*Drosophila Melanogaster*), modello animale classico della biologia molecolare, è uno dei primi organismi complessi di cui è stato sequenziato il genoma.

David Scharf/SPL/Grazia Neri

Uno dei paradigmi concettuali più nuovi e promettenti è conosciuto con l'acronimo Evo-Devo, che sta per «biologia evolutiva dello sviluppo» (*Evolutionary Developmental Biology*), e deriva dalla fusione di due approcci: quello che studia i meccanismi (genetici) dell'evoluzione e la formazione di nuovi organismi e quello che studia come i geni controllano lo sviluppo degli esseri viventi.

Quando, verso la fine degli anni ottanta, iniziò l'era del sequenziamento dei genomi, i ricercatori pensavano di poter trovare quali geni producono i diversi organismi grazie alla conoscenza di tutte le basi del DNA che compongono un genoma. Ora la nostra visione è cambiata, grazie a una fondamentale sorpresa: la genomica comparata mette in evidenza non tanto geni diversi tra i vari organismi, quanto piuttosto una grande conservazione di intere famiglie geniche.

In altre parole, è emerso che ciò che fa di una rana una rana o di una mosca una mosca ha poco a che vedere con la presenza di geni specifici dell'uno o dell'altro organismo: in realtà, è determinato dal modo in cui è regolata l'espressione degli stessi geni presenti nei diversi organismi. Inoltre, il semplice numero dei geni non è in rapporto con la complessità degli organismi, così come intuitivamente possiamo valutarla: il moscerino della frutta *Drosophila melanogaster* ha meno geni del vermicello nematode *Caenorhabditis elegans* (geni, peraltro, molto simili, omologhi). Insomma, gran parte della vita animale sul pianeta Terra impiega in differenti modi la stessa collezione (serie) di base di geni per produrre organismi molto diversi grazie alla modulazione dell'espressione di quei geni. Ai fini della diversità animale, quando e dove (anatomicamente) un gene si attiva nel corso dello sviluppo di un organismo è più rilevante della sostituzione di un amminoacido in una sua proteina.

Da questo tipo di considerazioni nasce l'esigenza di conoscere la composizione e il significato funzionale del DNA regolativo, di quel DNA, cioè, che non codifica per proteine e che a volte è ancora definito «DNA spazzatura» o «DNA ignorante» o «DNA egoista», poiché il suo ruolo si pone al di fuori di una ristretta visione gene-centrica.

Che cos'è un genoma

Il termine genoma fu coniato nel 1920 da Hans Winkler (1877-1945), nella versione tedesca *genom*, mentre studiava la partenogenesi nelle piante e negli animali, riferendosi a esso come l'insieme (quantificabile) dei cromosomi, intesi come i soli vettori dei fattori ereditari.

La quasi totalità dei genomi è composta di DNA. Solo pochi virus hanni genomi costituiti da RNA. I genomi si presentano in diverse dimensioni (GS, da *genome size*), e i GS aumentano grosso modo con l'evolversi dei taxa zoologici, variando negli eucarioti da meno di 10 Mbp (milioni di coppie di basi) a più di 100.000 Mbp (*si veda la figura in alto*), anche se questo aumento non si correla «bene» con l'aumento della complessità degli organismi (per esempio, vertebrati = massima complessità). Infatti il GS umano, con circa tre miliardi di coppie di basi, è simile a quello di molti anfibi, rettili, crostacei e insetti; il GS dei tritoni è addirittura di circa 15 miliardi di coppie di basi, come quello di alcuni pesci cartilaginei e di alcuni protozoi. Se le dimensioni dei genomi sono così diverse, la loro composizione è simile, e il genoma umano è per molti aspetti un buon modello dei genomi degli eucarioti. Una rassegna della sua composizione e organizzazione è già stata presentata (si veda *L'altro genoma*, in «Le Scienze» n. 421, settembre 2002); qui ricordiamo i dati di base utili per capire come evolvono i genomi e per attuare confronti con quelli degli altri taxa animali.

Il genoma umano è composto da circa tre miliardi di coppie di basi distribuite in molecole lineari di DNA, la più corta di 55 Mbp e la più lunga di 250 Mbp, contenute nei 24 diversi cromosomi (22 autosomi e due cromosomi sessuali). Ciascuna delle circa 10^{13}-10^{15} cellule (un milione di miliardi!) che compongono il corpo umano contiene una copia del genoma (l'unica eccezione è rappresentata da cellule terminalmente differenziate quali i globuli rossi, privi di nucleo). Il genoma umano contiene circa 30.000 geni, che costituiscono meno del due per cento delle sue dimensioni; il restante 98 per cento è composto da diverse classi di DNA, le cui variazioni quantitative sono responsabili dei diversi GS tra i taxa animali. Questo tipo di DNA è sempre presente in tutti i genomi studiati, anche se a volte in quantità ridotte, e ciò depone a favore di un suo significato funzionale, per quanto ancora poco svelato.

Oggi si riconosce che gli elementi di DNA ripetitivo interagiscono con i geni che si trovano nelle vicinanze e possono essere integrati nelle sequenze codificanti per proteine. Le sequenze di DNA che lo compongono hanno in comune la caratteristica strutturale di presentare sempre ripetizioni di una sequenza di basi più o meno lunga (il «monomero di ripetizione»), sebbene il grado di ripetizione possa variare (alto, medio, basso e ripetizioni uniche). Si possono distinguere sequenze ripetute che si trovano intersperse (sparse) nel genoma, o sequenze che sono raggruppate in serie, in tandem. Le modalità attraverso cui si originano le sequenze ripetute si basano su diversi meccanismi molecolari. Questi meccanismi sono sempre attivi, e originano variazioni quantitative delle varie famiglie di DNA ripetitivo, promuovendo così un costante rimaneggiamento, (*turnover*) della composizione qualitativa e quantitativa del genoma. La loro azione differenziale contribuisce alla diversificazione e all'evoluzione dei genomi dei diversi taxa animali.

Il turnover del genoma

Due sono i principali meccanismi molecolari che assicurano la genesi delle famiglie di DNA ripetuto: il *crossing over ineguale* e la *trasposizione* di sequenze di

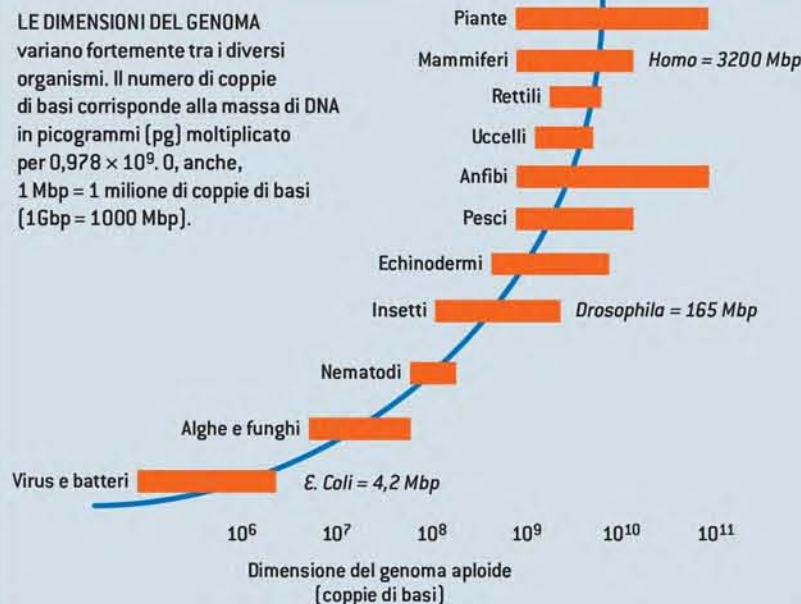
CHE COSA FA IL DNA NON CODIFICANTE

DNA strutturale

- stabilità delle origini di replicazione del DNA e dei telomeri
- organizzazione dei centromeri e dell'appaiamento meiotico dei cromosomi

DNA eurigenico

- coordina l'espressione di geni non vicini, degli attivatori e dei silenziatori genici
- regola l'espressione genica nel corso dello sviluppo

LE DIMENSIONI DEL GENOMA variano fortemente tra i diversi organismi. Il numero di coppie di basi corrisponde alla massa di DNA in picogrammi (pg) moltiplicato per $0,978 \times 10^9$. 0, anche, 1 Mbp = 1 milione di coppie di basi (1Gbp = 1000 Mbp).

IN SINTESI

- Ora che disponiamo di una buona quantità di genomi completamente sequenziati, il dato più sorprendente che emerge non è costituito dalle differenze, quanto dalle somiglianze tra le composizioni dei diversi genomi.
- Nasce così l'esigenza di conoscere la composizione e il significato funzionale del DNA regolativo, che non codifica per proteine, per affrontare lo studio dei fenomeni biologici dello sviluppo degli organismi e della loro evoluzione al di fuori di una ristretta visione gene-centrica.
- Varie modalità e diversi meccanismi molecolari producono un continuo rimaneggiamento della composizione e dell'organizzazione dei genomi, a partire da proprietà metaboliche intrinseche alle sequenze di DNA.
- In tal modo, i genomi si plasmano su diverse dimensioni fisiche e su diversi corredi di DNA ripetitivo a significato regolativo capaci di modulare variamente l'espressione dei geni che codificano proteine.
- Viene così generata una grande diversità genetica che si traduce in variabilità fenotipica selezionata dal mondo darwiniano nella variabilità biologica di specie animali e vegetali.

GLI AUTORI

CARLO ALBERTO REDI è docente di zoologia all'Università di Pavia. Si occupa di citochimica del DNA, dello sviluppo e della differenziazione delle cellule germinali e del loro impiego per saggi di ecotossicologia.
SILVIA GARAGNA insegna biologia dello sviluppo all'Università di Pavia, dove si dedica allo studio dei processi gametogenetici e delle prime fasi dello sviluppo in diversi modelli animali.
MAURIZIO ZUCCOTTI insegna istologia ed embriologia all'Università di Parma. Assieme a Ryuzo Yanagimachi, dell'Università di Hawaii, ha sviluppato gli studi che hanno portato, nel 1998, alla clonazione della topolina Cumulina.

Norbert Wu/Minden Pictures/Grazia Neri

IL GENOMA DEL PESCE PALLA GIAPPONESE (*Fugu rubripes*), contiene un numero di geni simile a quello umano, ma solo pochissimi dei suoi geni sono dotati di lunghi introni. Nel disegno in basso, i due principali meccanismi molecolari di duplicazione genica.

DNA dette mobili. Il primo origina sequenze disposte in tandem o duplicazioni di interi segmenti cromosomici, più o meno lunghi; si originano così i mini e i microsatelliti (circa il tre per cento del genoma), blocchi di DNA ripetitivo il cui monomero è ripetuto in tandem poiché gli eventi di duplicazione che lo hanno prodotto si sono verificati con una successione lineare. Il secondo origina sequenze di DNA ripetitivo intersperse qua e là nel genoma.

Il crossing over ineguale è il meccanismo più attivo ed efficace nel generare cambiamenti nel numero di geni per duplicazione di singoli geni o di interi segmenti cromosomici. La risoluzione di un appaiamento cromosomico non perfettamente simmetrico porta alla formazione di un cromosoma con un segmento di DNA in più (duplicato) mentre l'omologo erediterà un segmento in meno (deleto). Se l'evento si ripete più volte a carico di una certa sequenza, in un certo cromosoma si origina un sito che porta segmenti di DNA ripetuti in tandem. Nel corso del tempo si possono poi accumulare mutazioni nelle sequenze ripetute così generate. Lo studio del tasso di divergenza nucleotidica nelle sequenze ripetute permette una stima del tempo passato dall'origine della duplicazione: duplicazioni recenti saranno caratterizzate da una alta omologia di sequenza, quelle più antiche da un minor grado di omologia. Una serie di duplicazioni geniche e divergenze nelle sequenze nucleotidiche è quella che nel corso di milioni di anni ha portato un ancestrale gene per la globina – la parte proteica dell'emoglobina – a diversificarsi negli attuali geni della globina alfa (sul cromosoma 16) e della globina beta (cromosoma 11).

La trasposizione è invece il movimento di una sequenza di DNA, detta elemento genetico mobile o trasposone, da un sito a un altro di una molecola di DNA, capace di generare famiglie di DNA ripetuto intersperse qua e là nel genoma. La trasposizione può avvenire in modo diretto o indiretto (retrotrasposizione); e in quest'ultimo caso richiede l'intermediazione di molecole di RNA. La trasposizione può generare nuove copie di trasposoni (replicativa) o semplicemente spostare il sito di integrazione dell'elemento mobile (conservativa).

Le sequenze intersperse nel genoma appartengono a due grandi famiglie, i DNA trasposoni e gli RNA trasposoni, o retroelementi. Questi ultimi sono a loro volta distinti in LTR (Long Terminal Repeat) trasposoni o retrotrasposoni e non-LTR trasposoni o retroposoni dei tipo SINE (Short Interspersed Nucleotide Element) o LINE (Long Interspersed Nucleotide Element: *si veda lo schema in alto*).

I DNA trasposoni (tre per cento del genoma umano) sono stati i primi elementi mobili scoperti agli inizi degli anni cinquanta da Barbara McClintock, premiata con il Nobel nel 1983 appunto «per la scoperta degli elementi genetici mobili» nel mais. È chiaro però che la scoperta è stata a lungo ignorata dalla comunità scientifica; ci sono voluti trent'anni per realizzarne la rilevanza ai fini della nostra comprensione del funzionamento del genomi. La capacità di trasposizione diretta da un sito all'altro del genoma è dovuta al fatto che all'interno della sequenza di DNA che costituisce il DNA trasposone si trovano i geni che codificano per gli enzimi (trasposasi) necessari al taglio e alla reintegrazione dell'intero elemento genetico.

Ciò assicura ai DNA trasposoni anche la capacità di trasferirsi dal genoma di un organismo a quello di un altro, ovvero di realizzare il trasferimento genico orizzontale: un DNA trasposone chiamato *mariner* (lungo 1250 bp) si ritrova in diversi taxa animali, dalla *Drosophila melanogaster* all'uomo. I retroelementi si spostano e si moltiplicano grazie a un meccanismo detto di «retrotrasposizione», che si attua in tre passaggi: a) la produzione di una copia di mRNA del trasposone nel corso del regolare processo di trascrizione del DNA; b) la conversione della copia di RNA in una molecola di DNA per opera di un enzima chiamato trascrittasi inversa, il cui gene di solito è presente all'interno della sequenza di DNA che costituisce il retroelemento; c) la copia di DNA del retroelemento si integra il più delle volte nello stesso cromosoma, nello stesso sito, ove si trova la copia originale del retroelemento. Il risultato finale è la produzione di due copie del trasposone, a volte in siti diversi del genoma. Le famiglie di retroelementi più rappresentate nel genoma umano, 16 per cento e 10 per cento rispettivamente, sono le sequenze L1 (di tipo LINE) e quelle Alu (di tipo SINE; così chiamate perché presentano siti di taglio per l'enzima Alu I). Quelle LTR costituiscono l'otto per cento del genoma, e hanno una struttura nucleotidica molto simile a quella dei retrovirus (il più noto dei quali è l'HIV, responsabile dell'AIDS) con lunghe sequenze di ripetizione alle estremità del retroelemento.

I RETROVIRUS SONO AGENTI INFETTIVI che sfruttano lunghe sequenze nucleotidiche poste agli estremi 3' e 5' del proprio genoma (LTR) per fornire segnali capaci di far trascrivere RNA di tre proteine coinvolte nella retrotrasposizione: «gag» (antigeni di specificità), «pol» (trascrittasi inversa), «env» (proteine dell'involucro virale). Il loro RNA genomico è convertito in una molecola di DNA prima dell'integrazione nel genoma dell'ospite. I retrotrasposoni LTR hanno una struttura simile a quella dei retrovirus, solo mancano del gene «env», e quindi non sono capaci di produrre particelle infettive in grado di lasciare la cellula. I retrotrasposoni non-LTR, per esempio quelli della famiglia LINE, usano un promotore della RNA polimerasi II per trascrivere RNA che codifica per due proteine: ORF1 per una proteina di legame con l'RNA e ORF2 per una endonucleasi e per la trascrittasi inversa. Quelli della famiglia SINE impiegano un promotore per la RNA polimerasi III (A e B) per produrre un piccolo RNA capace di cooptare l'attività di retrotrascrizione di elementi LINE.

Rene Krekels/Minden Pictures/Grazia Neri

DIVERSI RIMANEGGIAMENTI DEL GENOMA dovuti a retroelementi: a) inserzione in un nuovo sito genomico di un elemento L1 troncato, più breve; b) inserzione con inversione di un segmento dell'elemento L1; c) inserzione in un nuovo sito con trasduzione di piccole porzioni genomiche; d) inserzione di un elemento L1 con delezione di sequenze genomiche; e) durante l'inserzione, altri RNA possono essere integrati; f) elementi SINE possono inserirsi grazie alla macchina enzimatica di L1; g) duplicazioni e delezioni cromosomiche per crossingover ineguale; h) elementi mobili possono generare eventi di ricombinazione illegittima.

A fronte: con 15 miliardi di coppie di basi, il genoma dei tritoni ha una dimensione cinque volte maggiore di quello umano.

PER APPROFONDIRE

DOVER G., *How genomic and developmental dynamics affect evolutionary processes*, in «BioEssays», n. 22, pp. 1153-1159, 2000.

BONCINELLI E., *Biologia dello sviluppo*, Carocci Editore, 2001.

REDI C. A., GARAGNA S., ZUCCOTTI M., *L'altro genoma*, in «Le Scienze» n. 409, pp. 36-42, settembre 2002.

SHAPIRO J. A., *A 21 st century view of evolution*. in «Journal of Biological Physics», n. 28, pp. 745-764, 2002.

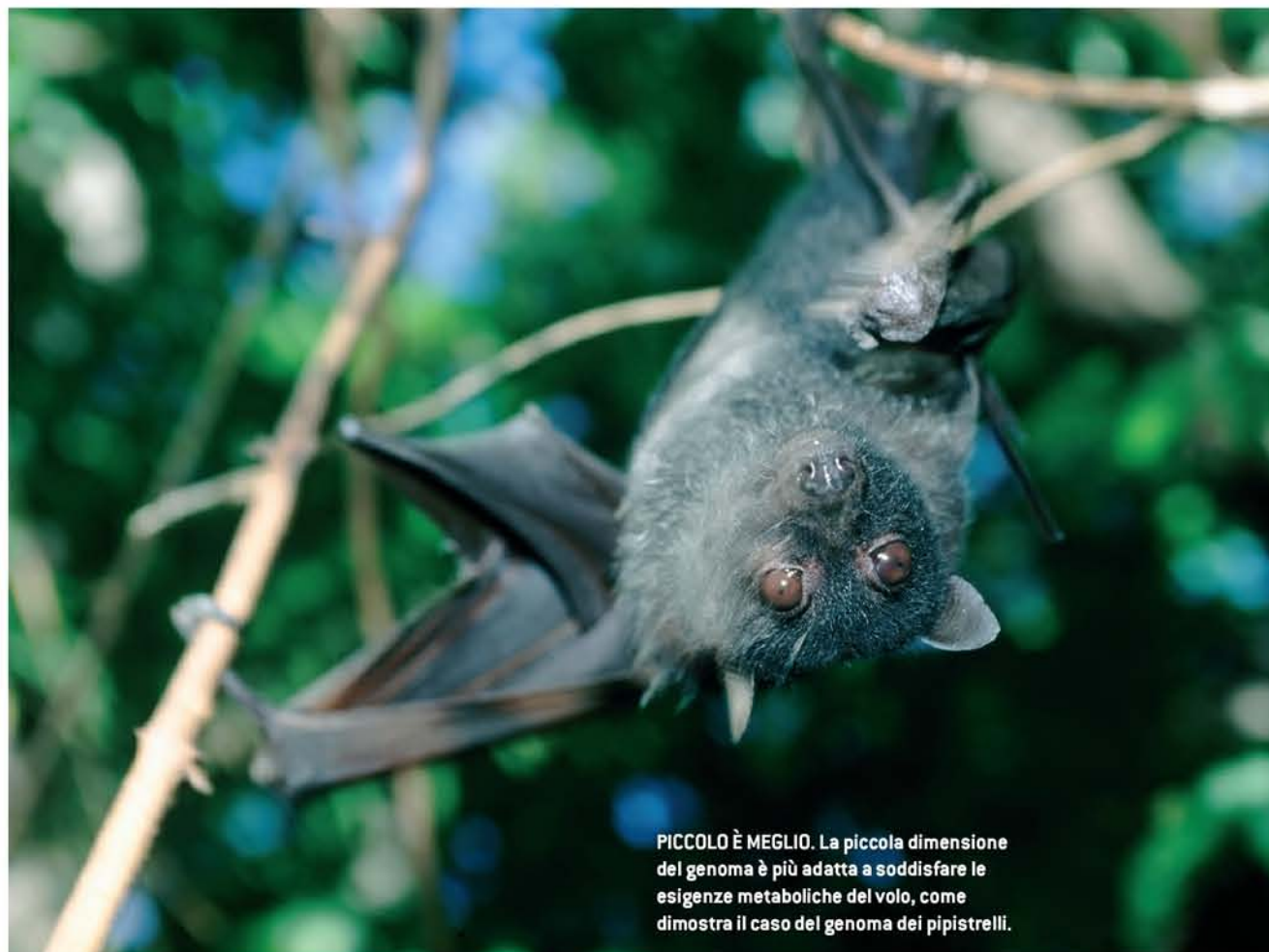
GOULD S. J., *La struttura della teoria dell'evoluzione*, Codice Edizioni, 2003.

Le sequenze neoduplicate possono spontaneamente acquisire funzionalità genica, dare origine a nuovi geni, tramite un processo che si dice di «esonizzazione» (trasformazione in esoni di sequenze ripetute); questo fenomeno accade di frequente nelle sequenze Alu. Se ciò accade, la proteina prodotta dall'esone Alu può acquisire una nuova funzione fisiologica, a volte in grado di favorire l'adattabilità dell'organismo, mentre la proteina codificata dall'esone originale continua a svolgere il proprio ruolo fisiologico. Sequenze ritenute ignoranti sono quindi in grado di influire sull'espressione genica e sulla diversità genetica di una popolazione, fattore quest'ultimo su cui si basa l'impianto concettuale darwiniano per spiegare l'evoluzione delle specie.

Le sequenze SINE costituiscono circa il 14 per cento del genoma, e sono prevalentemente localizzate in regioni ricche di geni e di basi GC. È probabile che derivino dalle sequenze LINE di tipo L1. Le sequenze L1, localizzate in regioni povere di geni e di basi GC, rappresentano circa il 20 per cento del genoma, e sono una delle 12 famiglie di non-LTR retroposoni (da sola ne costituisce circa l'80 per cento) dotate di una grande attività di rimaneggiamento del genoma. I tipi di DNA ora ricordati sono anche chiamati DNA intergenico, e rappresentano circa il 75 per cento del genoma. Il 25 per cento circa di DNA genico è quasi totalmente rappresentato da introni (23 per cento), considerando che solo circa il due per cento del genoma codifica per proteine e l'uno per cento è costituito da pseudogeni. La comparazione della composizione di genomi appartenenti a diversi taxa animali permetterà di chiarire ulteriormente i meccanismi di amplificazione e delezione degli elementi di DNA ripetitivo e come essi siano in grado di generare variabilità funzionale che si esprime in diversità genetica della popolazione, una diversità suscettibile di selezione (ed è qui che entra in scena il mondo darwiniano).

Identificare il genoma vertebrato «essenziale» potrebbe aiutare a risolvere problemi cruciali in biologia. *Fugu rubripes*, il pesce palla giapponese, ha un genoma di dimensioni ridotte, ma un numero di geni stimato simile a quello umano. Il genoma di *Fugu* contiene solo pochissimi geni dotati di lunghi introni, mentre circa un quarto del genoma umano è costituito di sequenze introniche non codificanti. Circa il 10 per cento delle sequenze di DNA del pesce palla sono di tipo ripetitivo, e ciò suggerisce che anche il più piccolo genoma dei vertebrati richieda un minimo di DNA ripetitivo per regolare correttamente l'espressione genica.

Scolpire il genoma

Le sequenze di DNA ripetitivo sono il miglior candidato per costituire l'elemento fisico capace di collegare il mondo del nucleo (il genoma, il livello molecolare) con quello extra-nucleo (l'ambiente, il livello sovracellulare). Il loro studio permetterà di capire come si attui il dialogo tra i segnali che la complessità

PICCOLO È MEGLIO. La piccola dimensione del genoma è più adatta a soddisfare le esigenze metaboliche del volo, come dimostra il caso del genoma dei pipistrelli.

Mark A. Johnson/Corbis/Grazia Neri

dell'ambiente è in grado di rappresentare ed il genoma. Si fa sempre più strada l'idea che esistano dei «sistemi di ingegneria genetica naturali», basati su sistemi di trasduzione dei segnali extragenomici (extracellulari, ambientali in senso lato) al genoma, capaci di provocare rimaneggiamenti nella composizione dei genomi stessi. Diversi esempi sostengono questa visione. Il rimaneggiamento del genoma del mais in risposta a *genome shock* e le funzioni cataboliche inducibili in *Escherichia coli* confermano l'esistenza di sistemi genomici capaci di integrare i segnali ambientali. Anche le risposte di ricerca della luce e di fuga dall'ombra nelle piante (*Arabidopsis thaliana*), risposte mediate dai fitocromi, si basano su elementi ripetitivi con capacità regolatoria capaci di rispondere direttamente a specifici segnali ambientali. Un altro chiaro esempio del dialogo esistente tra i due mondi è il recentissimo dato che la retrotrasposizione di elementi Alu nell'uomo può essere indotta dalla esposizione all'etoposide (uno xenobionte inibitore della topoisomerasi II) ed è mediata da elementi LINE. Il fatto che la retrotrasposizione di elementi Alu possa essere indotta da agenti genotossici è una prova che i rimaneggiamenti del genoma possono essere scatenati anche da segnali ambientali: le conseguenti variazioni genomiche entrano quindi nel mondo darwiniano.

La dimensione stessa del genoma, imponendo vincoli fisici alle dimensioni cellulari, può avere un ruolo di collegamento tra i due mondi, e quindi un significato informazionale: è quanto sembrano suggerire i piccoli genomi dei pipistrelli. Essi sono dovuti alle variazioni quantitative delle sequenze ripetitive non codificanti, poco rappresentate nei genomi di tutti i pipistrelli. Poiché le dimensioni del genoma si correlano positivamente con il volume nucleare e cellulare, genomi piccoli sono più adatti per soddisfare le esigenze metaboliche richieste dal volo, prima fra tutte la necessità di scambi gassosi altamente efficienti per l'ossigeno e l'anidride carbonica (mediati dalla membrana cellulare, che in una cellula piccola presenta un rapporto superficie/volume a favore della superficie). A conferma di questo, gli uccelli volatori hanno genomi più piccoli di quelli corridori.

Da tutti questi dati emerge chiaro il concetto che le sequenze di DNA ripetitivo non sono inutili, e oggi è meglio riferirisi a esse come a un vero e proprio «scalpello genomico», capace di modellare il genoma conferendogli la capacità di rispondere a nuove richieste funzionali, quali quelle che un organismo può incontrare nell'esplorare nuove nicchie ecologiche o quelle che sorgono dal mutamento continuo dell'ambiente. Le variazioni nella composizione e nell'organizzazione del genoma (così come sono prodotte incessantemente dal metabolismo del DNA) vengono così esposte al mondo darwiniano: solo quelle variazioni che assicurano vantaggiose proprietà fenotipiche saranno selezionate a favore e quindi conservate nel genoma (grazie a un meccanismo di selezione tipicamente darwiniano).

Semplificando quanto brevemente esposto, si può considerare la composizione e organizzazione del genoma come il ponte di dialogo tra i due mondi, e suggerire che la relazione genoma-sviluppo-fenotipo sia il nuovo paradigma concettuale capace di spiegare in modo più esauriente lo sviluppo e l'evoluzione del disegno animale con la comparsa delle diverse specie così come oggi le apprezziamo. E ribadire che se anche la generazione delle novità genomiche non è sotto il diretto controllo dei meccanismi darwiniani, è proprio il meccanismo di selezione del fenotipo più adatto quello che in ultima analisi controlla la sopravvivenza delle novità genomiche.

Il giorno della stella nuova

Nell'ottobre del 1604, gli astronomi osservano in cielo uno strano fenomeno che ispira a Galileo un dialogo in cui sovverte gli schemi del cosmo aristotelico

di Giulio Peruzzi

DIALOGO
DE CECCO DI RONCHITTI
DA BRVZENE.
IN PERPVOSITO
DE LA STELLA NVOVA.
Al Lostrio e Rebelendo Segnor Antuogno Squerengo degnetissemo Calonego de Paua, sò Paròn.
Con alcune ottaue d'Incerto, per la medesima Stella, contra Ar stotele.

IN PADOVA,
Appresso Pietro Paulo Tozzi. M.DC.V.

I RESTI DELLA SUPERNOVA 1987A in una foto scattata dallo Hubble Space Telescope nel 1994. Nel 1604, Galileo e gli astronomi del tempo non avevano certo strumenti che permettessero di discernere nei dettagli un simile spettacolo, ma la «nascita» di un nuovo corpo luminoso nel cielo bastò a mettere in discussione la cosmologia aristotelica.

Space Telescope Science Institute/NASA/SPL/Grazia Neri

Ottobre 1604. Gli occhi degli astronomi sono puntati da tempo sulla regione della volta celeste compresa tra la costellazione del Sagittario e quella dell'Ofiuco, o Serpentario. Osservano un evento assai raro, ancorché ciclicamente ricorrente e prevedibile: la congiunzione celeste di tre pianeti, cioè l'avvicinamento nel cielo di Giove, Saturno e Marte. Sono in molti a fissare lo sguardo in direzione di quella zona del cielo quando, con grande meraviglia, vedono apparire all'improvviso – chi dice il 9, chi il 10 ottobre – una nuova sorgente luminosa. La misteriosa fonte di luce cresce di intensità per un paio di settimane, fino a eguagliare Venere, per poi perdere progressivamente luminosità sparendo alla vista circa un anno e mezzo dopo l'apparizione.

Emozioni contrastanti agitano le persone che osservano il fenomeno: un misto di stupore e paura, di superstizione e curiosità emerge dalle lettere e dai resoconti dell'epoca. Si ricorda un'analoga apparizione e successiva scomparsa di una *stella nova* nella costellazione di Cassiopea, osservata da Tycho Brahe nel novembre 1572, che aveva suscitato qualche clamore anche tra la popolazione; mentre sono in pochi a sapere che un fenomeno apparentemente simile, anche se meno luminoso, era stato osservato da Willem Blaeuw nella costellazione del Cigno nell'agosto del 1600 senza destare troppa attenzione.

Di che cosa si trattava? Oggi sappiamo molto di quelle apparizioni. Con i nostri raffinati strumenti possiamo osservare i loro «resti», e abbiamo a disposizione una teoria abbastanza soddisfacente dell'evoluzione stellare, che permette di catalogare l'apparizione di quei nuovi corpi celesti nella vasta classe delle «stelle variabili». È quindi assodato che nel 1572 e nel 1604 ci si trovava di fronte a due «supernove» – termine introdotto da Fritz Zwicky e Walter Baade nel 1934 –, eventi catastrofici nell'evoluzione stellare durante i quali una stella aumenta improvvisamente di luminosità diventando visibile a grandi distanze. Nel 1600 si trattava invece di una «stella supergigante» (oggi nota come *P Cygni*), la cui luminosità varia nel tempo in modo più o meno regolare e più o meno intenso: una sorta di supernova permanente, che venne poi osservata indipendentemente a più riprese nel corso del Seicento.

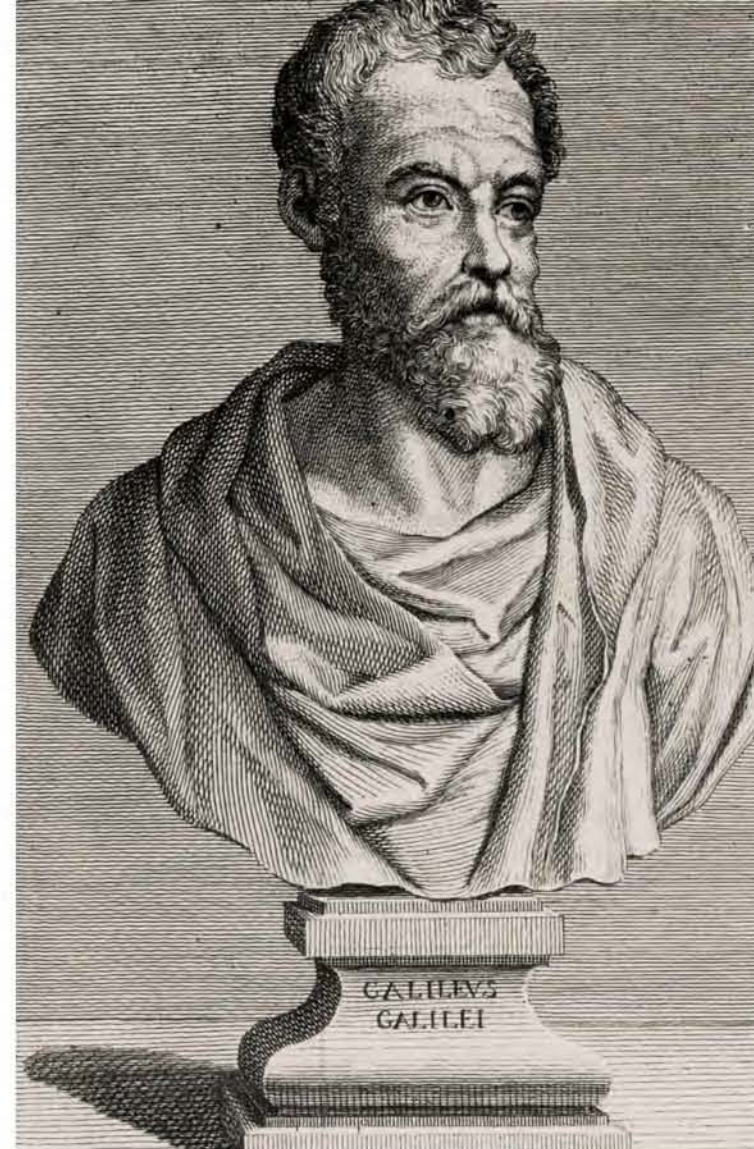
Un cielo di stelle fisse

Ma nel 1604 le conoscenze erano ben diverse. La concezione dominante, sostenuta dai seguaci di Aristotele, distingueva i fenomeni e gli oggetti celesti da quelli terrestri. Le stelle, create *ab initio* da Dio, erano formate da una sostanza speciale, una quintessenza perfettissima non soggetta a variazione alcuna: la loro perfezione si rispecchiava nella perfezione dei loro eterni moti circolari. Al contrario la regione sublunare, comprendente l'atmosfera e la Terra, era sede del divenire, della vita e della morte, della generazione e della corruzione. E ospitava corpi formati dalla mescolanza di quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco. Questi corpi, a seconda della proporzione degli elementi costituenti, avevano una loro collocazione «naturale» a una certa altezza o distanza dal centro della Terra: se si trovavano in luoghi diversi, compivano moti «naturali» in linea retta che li riportavano nel loro luogo naturale. Su questa base si spiegava, per esempio, il moto di un grave verso la superficie della Terra, e il movimento verso l'alto della fiamma.

Una siffatta concezione del cosmo, fortemente intrisa di elementi teologici e metafisici, non poteva accordarsi con l'apparire di nuove stelle: queste apparizioni o generazioni dovevano essere legate a enti o corpi situati non nella regione celeste ma in quella sublunare. Dovevano cioè, in ultima analisi, essere fenomeni meteorologici, per quanto rari e strani. E non a caso la discussione sulla nuova apparizione si accese intorno alla sua collocazione. In gioco non c'era solo la spiegazione di un evento, per quanto singolare, ma una visione millenaria del cosmo sostenuta da una filosofia della natura che era diventata nei secoli sempre più attenta a maneggiare bibliografie, glossare libri e a ricercare una presunta coerenza con le sacre scritture, perdendo progressivamente di vista la rilevanza dell'osservazione diretta. Una filosofia-teologia della natura che cercava di difendersi da attacchi che dalla metà del Cinquecento si erano fatti sempre più frequenti. La controversia scientifica coinvolgeva quindi poteri e autorità consolidate sia nella Chiesa sia nell'Accademia.

Il lettore dello Studio di Padova

A Padova, dove la *stella nova* venne avvistata per la prima volta il 10 ottobre, la polemica fu assai vivace, e coinvolse l'intera città, eccitando la curiosità e le paure del popolo e l'attento interesse degli studiosi. Galileo, allora lettore di matematica e astronomia allo Studio di Padova, particolarmente apprezzato per le sue capacità didattiche, aveva scelto come argomento delle sue lezioni per l'anno 1604-1605 «le teoriche dei pianeti». Fu quindi naturale che amici e studenti lo sollecitassero a esprimersi sul fenomeno, cosa che egli fece in tre pubbliche lezioni, svoltesi probabilmente tra la fine di novembre e la prima metà di dicembre. L'aspettativa era tale che alle lezioni parteciparono più di mille persone.

Purtroppo dei testi scritti di queste lezioni, ammesso che siano mai stati completati da Galileo, rimangono solo frammenti e note sparse. Dalla sua corrispondenza privata si ricava però che era convinto che l'indagine intorno alla sostanza e generazione della *nova* potesse avvalorare sia il fatto che la fisica del Cielo e quella della Terra fossero unificabili, sia che la proposta copernicana fosse quella corretta: sarebbero così caduti due caposaldi della tradizione aristotelica.

D'altra parte in quel periodo Galileo stava lavorando allo studio dei moti locali proprio in vista di superare una serie di paradossi che sembravano invalidare la proposta copernicana. Uno per tutti: perché, se la Terra gira, si osserva che un corpo in caduta libera da una torre arriva alla base di questa e non a grande distanza, a causa del moto di rotazione della superficie terrestre? Era dunque presente, nelle ricerche galileiane, una forte matrice antiaristotelica, e questa matrice, riproposta nelle tre lezioni sulla «stella nuova», suscitò una vivace discussione nel mondo accademico padovano, dove – come sempre – le questioni scientifiche si mescolavano con quelle personali, di prestigio e di potere.

Basti qui ricordare che Cesare Cremonini, autorevole studioso di Aristotele e professore sulla prima cattedra di filosofia naturale dello Studio di Padova, contestava apertamente Galilei difendendo la tradizione aristotelica. È probabile che sia stato proprio Cremonini a ispirare, almeno in parte, la pubblicazione in Padova, alla fine del gennaio 1605, del *Discorso intorno alla nuova stella* di Antonio Lorenzini da Montepulciano. Nucleo dell'argomentazione era la strenua difesa della perfezione dell'essenza celeste: l'ingenerabilità e incorruttibilità dei cieli dovevano implicare che la *nova* nient'altro fosse che una meteora collocata nel mondo sublunare. Per sostenere questa sua convinzione, Lorenzini citava Aristotele, secondo il quale se una stella si fosse aggiunta al cielo questo non avrebbe più potuto muoversi. Introduceva poi una serie di riflessioni sul fatto che, essendo il cielo formato solo da una quintessenza, in esso non potevano prodursi gli elementi contrari necessari alla corruzione e generazione, e concludeva con la domanda retorica: in quale modo il cielo ha potuto corrompere il cielo per generare il cielo?

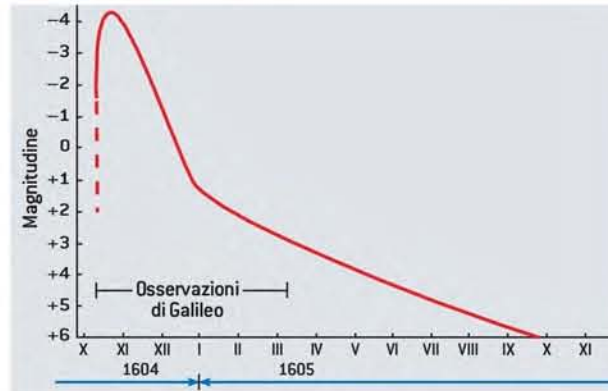
La risposta a Lorenzini non si fece attendere. Sei settimane dopo l'edizione del *Discorso intorno alla nuova stella* veniva infatti pubblicato a Padova un breve opuscolo dal titolo *Dialogo de Cecco di Ronchitti da Bruzene in perpuosito della Stella Nuova*, dove comparivano, nelle «rubriche a margine», puntuali riferimenti al testo del Lorenzini. Scritto in dialetto pavano, il *Dialogo* ha per protagonisti due contadini, Natale e Matteo: il primo riporta le opinioni di un «letterato da Padova» (il Lorenzini) e l'altro le mette alla berlina utilizzando argomentazioni di chiara ispirazione galileiana esposte in modo semplice e con esempi tratti dalla quotidianità. È ormai assodato che il testo è un'opera scritta a quattro mani da Galileo e da Girolamo Spinelli, un giovane monaco benedettino che frequentava la cerchia galileiana. Di questa cerchia facevano parte intellettuali e uomini di chiesa – tra i quali il canonico Antonio Querengo, a cui è dedicato il *Dialogo* – accomunati non solo dall'interesse per i nuovi sviluppi della scienza, ma anche dalla passione per il dialetto pavano e per il suo grande mentore, il Ruzante, al secolo Angelo Beolco. E in linea con Ruzante è non solo la scelta del dialetto pavano ma anche quella dei personaggi rustici che dimostrano come il buon senso *snaturale* possa averla vinta sulla cultura libresca.

Percorso da una continua vena di ironia particolarmente evidente nell'originale in dialetto, il *Dialogo* inizia con lo scambio

La concezione aristotelica distingueva **i fenomeni e gli oggetti celesti** da quelli terrestri

LA PADOVA DI GALILEO, qui in un'incisione dell'epoca, era una vivace cittadina universitaria in cui fioriva lo studio delle scienze: del 1545 è il Giardino dei Semplici, primo orto botanico universitario, mentre tra il 1594 e il 1595 vi fu progettato il primo teatro anatomico stabile del mondo. Sopra, un'incisione a bulino di Tommaso Piroli che ritrae Galileo, conservata presso la Biblioteca civica di Padova.

CHE COS'È UNA SUPERNOVA?

Questo grafico riassume, sulla base dei documenti esistenti, l'andamento della luminosità della «stella nova» tra l'ottobre 1604 e i primi mesi del 1605. Le sorgenti variabili di luce come quella del 1604 sono oggi classificate come supernove, e si tratta di gigantesche esplosioni termonucleari che si verificano in stelle di grande massa o nelle cosiddette nane bianche. In questi catastrofici processi della dinamica stellare viene emessa una quantità di radiazione che può essere pari a quella di alcuni miliardi di soli. In anni recenti, la più spettacolare esplosione di supernova è stata la 1987A (in basso, in una fotografia di Andrew Malin dell'Anglo-Australian Observatory).

OPERA DEL PITTORE FIAMMINGO JUSTUS SUSTERMANS, il più celebre dei ritratti di Galileo è conservato agli Uffizi di Firenze.

di battute tra Natale e Matteo sulla presunta correlazione tra la siccità delle campagne e l'apparizione della nuova stella. Ma se è veramente una stella, afferma Matteo, «essendo tanto lontana» sarà difficile provare che sia «lei che non lascia piovere». Natale allora osserva che un letterato padovano sostiene in un suo «librazzuolo» che la *nova* si trova in realtà nella regione sublunare. Al che Matteo domanda se l'autore dello scritto sia esperto di misure, e saputo che «l'è Filuorico», cioè filosofo, reagisce sdegnato chiedendosi «che ha che fare la sua filosofia col misurare?»: sono i matematici che misurano, e a loro bisogna rivolgersi. Già, risponde Natale, anche il letterato dice che i matematici fanno misure, ma non capiscono nulla, perché dalle loro misure hanno dedotto che la stella sia molto lontana e questo implica un'inammissibile generazione e corruzione del Cielo. Ma questo non deve interessare ai matematici, risponde Matteo piccato, perché loro si occupano del misurare e non dell'essenza o della sostanza degli enti che misurano: se anche la stella fosse di polenta, non di meno essi potrebbero prenderla di mira! (*Se'l foesse an de Polenta, no poraegi ne pi, ne manco tuorlo de smira? mo el me fà ben da rire, con ste suò sbagiaffari.*)

I lettori del *Dialogo* sono quindi avvertiti: la controversia sulla stella non riguarda il mero perimetro dell'osservazione astronomica ma coinvolge il nucleo delle credenze consolidate della tradizione filosofica. E proprio queste credenze vengono criticate e dileggiate nelle parole di Galileo. Ce n'era abbastanza perché Galileo preferisse stampare il dialogo sotto pseudonimo. La cosa era comunque comune per l'epoca, ma qui le questioni erano assai delicate, e avevano già cominciato ad agitare i poteri consolidati dentro e fuori l'accademia.

Abbiamo scelto di pubblicare integralmente il *Dialogo* nelle pagine che seguono perché è qui che per la prima volta Galileo mette a nudo le contraddizioni della filosofia aristotelica, e dunque questo volumetto segna una tappa fondamentale della conoscenza moderna. E lo pubblichiamo nella traduzione di Antonio Favaro (*Le Opere di Galileo Galilei*, Le Monnier, 1890) perché il lettore, basandosi su una versione dell'originale in un linguaggio seicentesco, possa apprezzare la vivacità dell'intervento di Galilei in un periodo di ricerche che precede di qualche anno l'avvento del telescopio e che già vede emergere i primi elementi della nuova teoria galileiana del moto. Insomma, il *Dialogo di Cecco* è un piccolo capolavoro, concepito in una fase particolarmente cruciale dell'opera galileiana. Un primo esercizio, tra l'altro, di quella modalità espositiva che sarà utilizzata da Galileo nei suoi grandi capolavori della maturità: il *Dialogo sopra i massimi sistemi del mondo*, del 1632, e i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, del 1638.

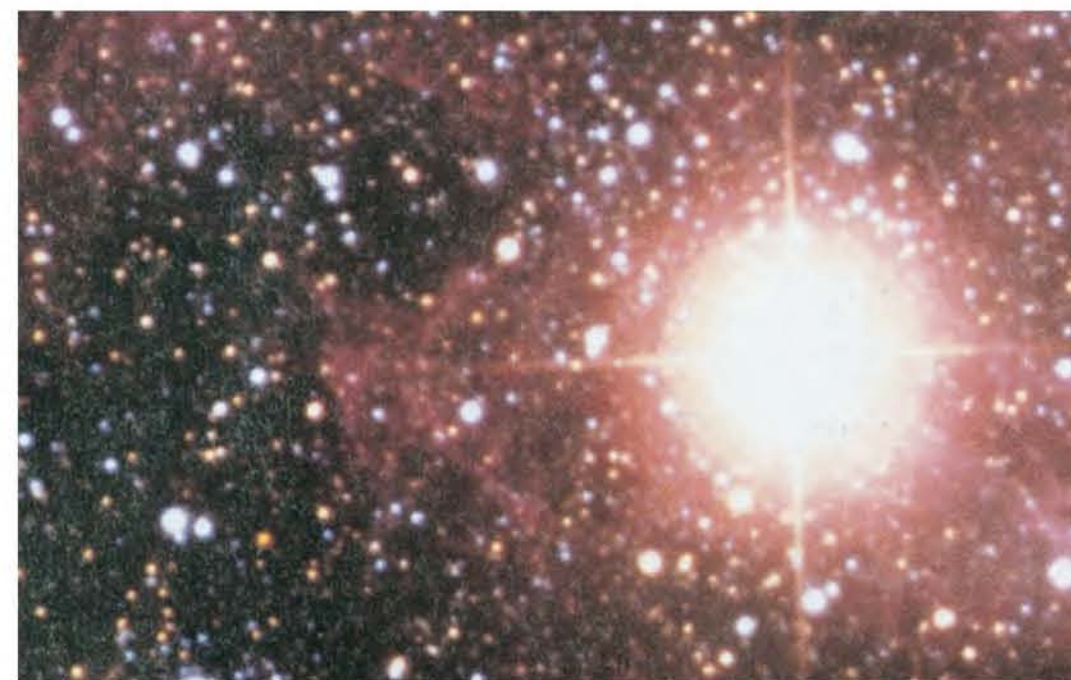
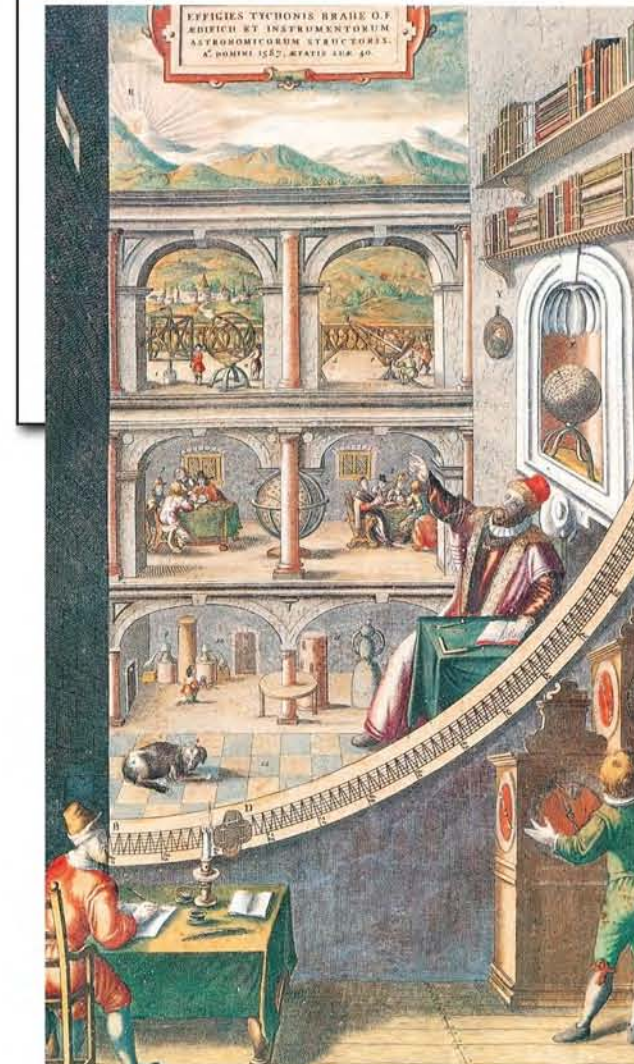
L'AUTORE

GIULIO PERUZZI insegna storia della fisica all'Università di Padova. Per «Le Scienze», ha scritto le biografie di Maxwell e Bohr. Con Tullio Regge ha recentemente pubblicato *Spazio, tempo e universo* (UTET, 2003).

PER APPROFONDIRE

BELLONE ENRICO, *La Stella Nuova. L'evoluzione e il caso Galilei*, Einaudi, Torino, 2003.

BUCCIANTINI MASSIMO, *Galileo e Keplero. Filosofia, cosmologia e teologia nell'Età della Controriforma*, Einaudi, Torino, 2003.

FAVARO ANTONIO, *Galileo Galilei e lo Studio di Padova*, Le Monnier, Firenze 1883, voll. 2 (ristampa Editrice Antenore, Padova, 1966).

MISURARE LE STELLE

Per osservare la «stella nova» del 1604, probabilmente Galileo si servì degli strumenti più «moderni» dell'epoca (per l'arrivo del cannocchiale, che Galileo avrebbe dominato con grande perizia, ci voleva ancora qualche anno), strumenti basati sullo stesso principio del grande quadrante in ottone di Tycho Brahe all'Osservatorio di Uranjborg (*a sinistra*). L'asta del quadrante (*in giallo nello schema qui sotto*) è mobile: così, puntando una stella, l'osservatore può misurarne la distanza angolare rispetto allo zenith. Dalle sue misure della supernova, Galileo giunse alla conclusione che non si spostava rispetto al cielo delle stelle fisse. Di per sé, dunque, quell'osservazione non implicava l'accettazione del sistema copernicano.

Dialogo de Cecco di Ronchitti da Bruzene in perpuosito de la Stella Nuova

ALL'ILLUSTRE E REVERENDO PADRONE.
IL SIGNOR
ANTONIO QUERENGO
DEGNISSIMO CANONICO DI PADOVA.

Che direste, Reverendo Signor Padrone, se vedeste un vostro povero servitore, il quale non s'è mai occupato d'altro che del proquoio, nè altro mestiero ha fatto che di misurare le campagne, pigliarsela adesso con un Dottor di quelli da Padova e mettercisi a disputare? La non vi parrebbe una celia? eppure, canchero! è proprio vero. Così fate conto ch'io ho fatto come fece colui che si messe il vestito che non era suo, per parer lui il dottore. È vero che fin da ragazzetto, il mio naturale mi tirava a guardare in alto, e avevo un gran piacere scorgendo Venere, la Cintura d'Orione, l'Occhio del Toro, le Pleiadi, il Carro; con tutto ciò, neanche per questo non n'avrei mica saputo parlare, se non avessi sentito voi mille e millanta volte dire ora una cosa, ora un'altra, a questo proposito. E così di questa Stella nuova, che dà tanta meraviglia a tutto l'universo mondo, in quanto a dire dove la sia, n'avete, per mo' di dire, fatta notomia, parlando e disputando con quanti dicevano che la non era in Cielo; e sebbene non ve n'addavi, nientedimeno mi vi cacciavo alle costole io, e vi stavo a sentire, e così (sebbene non abbia un cervello speculativo, come hanno degli altri) ponevo mente a ciò che dicevi. Ora dunque, perchè adesso io le ho mese tutte insieme in questi scartabelli, fate conto, ch'io mi sia infilato il vostro gabbano: se farà figura, l'onore sarà vostro; ma se per mala sorte ci fosse qualche cacherello (che non lo credo) che volesse stracciarmelo, e' vi toccherà allora anche a darmi aiuto, una volta che gli è vostro. Caro Padrone, abbiatemi per raccomandato, chè anch'io pregherò poi sempre Domineddio che vi dia vita lunga e sanità.

Da Padova, l'ultimo di Febbraio del mille e seicento e cinque.
Servitore della Signoria Vostra
CECCO DE' RONCHITTI.

DIALOGO
DE CECCO DI RONCHITTI
DA BRVZENE.
IN PERPVOSITO
DE LA STELLA NVOVA.
Al Loſtrio e Rebelendo Segnor Antuogno Squerengo degnetiſſemo Calonego de Paua, sò Paròn.
Con alcune ottaue d'Incerto, per la medeſima Stella, contra Ariſtotele.
IN PADOVA,
Appreſſo Pietro Paulo Tozzi. M.DC.V.

IN PERPUOSITO DE LA STELLA NUOVA.
DIALOGO

Interlocutori: MATTEO, NATALE.

Mamma mia! ma che asciutto, che arsura è questa? So che non vuol piovere, io! addio acqua. O non dicono che a Venezia, a un po' per volta, son secche le lagune? Figuratevi, si vien a piedi insino a Lizzafusina. S'ha un bell'aspettare che nascano i frumenti; e' nasceranno, come disse Maschio.

NA. Oh, ben trovato, Matteo! Di che tu discorri? Che hai, che te ne stai così soprappensiero?

MA. Benvenuto, Natale! Ma, caro fratello, non lo so nemmen io. I'm'andavo lambiccando il cervello perchè non piove. O a te, che te ne pare di questi tempi? c'è il pericolo che gli argini del Gorzone si rompano per le piene?

NA. In quanto a quello, gli è un gran dire che tante volte si son viste da ogni parte nuvole da pioggia, e pure son tornate indietro senza bagnare la sabbia neppur tanto quanto avrebbe fatto una pisciata di ranocchio. Io credo che se sèguita così, davvero ci s'avvicina al finimondo. I prati son tutti bruciati, le campagne secche com'un osso, tanto che a lungo andare, noi e il bestiame non possiamo cavarcela che malamente.

MA. Mettiti un po' sotto questo noce; a ogni modo c'è più d'un'ora a sera. Da che tu credi mo', che proceda quest'asciuttole, eh?

NA. O che non hai visto quella stella che risplendeva la sera, tre mesi fa, che pareva un occhio di civetta? E così adesso la si vede la mattina, quando si va a potare le viti, che la fa uno splendore bellissimo. Non te n'accorgi tu che 1'è venuta di fresco? e che non s'era mai più vista prima d'adesso? L'è proprio lei la cagione di queste meraviglie e di questi seccori, secondo che dice un dottore di Padova.

MA. Che ne sai tu che non la si sia mai più vista?

NA. Io ho sentito l'altro giornaccio uno che leggeva un certo libricciuolo, e diceva che la si è cominciata a scorgere solamente agli 8 del mese d'ottobre passato. E quel libricciuolo, e' l'aveva fatto un letterato da Padova, che contava poi cose assai.

MA. Doh che venga il canchero ai cacherelli da Padova! forse costui, perchè non l'ha veduta lui, vuole che tutti gli credano, che la non ci sia stata mai? Nemmeno io non ho mai veduto Tedescheria, eppure la c'è.

NA. Oh quant'a quello, e' mi par proprio anche a me che la sia nuova.

MA. Io non dico all'incontrario, io: gli è che il suo modo di ragionare non sta, se anche e' fosse da grammatico.

NA. Noi conveniamo dunque che essa è nuova.

MA. Sì, ma essendo tanto lontana, e' non può sapere ciò che la sia, per dire che l'è lei che non lascia piovere.

NA. Mio Dio, lontana! la non è neppure sopra alla Luna, per quanto diceva quel libricciuolo.

MA. Chi è quello che ha fatto il libricciuolo? È egli agrimensore?

NA. No, che gli è filosofo.

MA. Filosofo, gli è? che ha che fare la sua filosofia col misurare? Non sai tu che un ciabattino non può ragionare di fibbie? E' bisogna credere ai matematici, che sono misuratori dell'aria: siccome anch'io misuro le campagne, e così posso dire a ragione quanto le son lunghe e larghe: e così anche loro.

AL LOSTRIO.
E REBELENDO PARON.
EL SEGNOR
Antuogno Squerengo
Degnetiſſimo Calonego de Paua.
QVe diſſeo, Rebelēdo Segnor Paròn, s'a veeſsè on voſtro puouero ſeruiore, que no fè mè altro, che la boaria, e'l meſtiero de pertegar le cam pagne, adeſſo, que el la toleſſe co' vn Dottore de quiggi da Paua, per via de desbuta? no ve pareraela na botta da rire? mo cancarè; e ſi l'è vera. Tamentre fè conto c'hò fatto con fè quellù, che ſe meſ ſe la veſta, que n'iera ſoa, per parer ello dottore. L'è vera, que inchinda da toſatto, el
A 2 me

NA. E' diceva proprio appunto quel libricciuolo, che i matematici credono che la sia alta dimolto; ma che non ci capiscono.

MA. Ma perchè non ci capiscono? Mi canzona, o mi fa all'amore?

NA. Dice che e' s'immaginano che il Cielo sia corruttibile e generabile, così a un po' per volta, se pure e' non potesse generarsi e corrompersi tutto in un fiato: che so io?

MA. Dove i matematici ragionan eglino in questo modo? Se loro si occupano solamente del misurare, che gli fa egli a loro s'e' sia generabile o no? S'e' fosse anche di polenta, non potrebbero essi nè più nè meno prenderlo di mira? Oh, e' mi fa proprio ridere con queste sue ciarle.

NA. Ma il bello si è, che egli dice cose di questa fatta in parecchi luoghi di quel libricciuolo.

MA. O che vuo' tu ch'io gli faccia, se gli è giovane? lascia ch'e' se ne cavi la voglia.

NA. Egli diceva che se la fosse generata di fresco nel Cielo, e' bisognerebbe anche che un'altra Stella, o qualch'altra cosa, si fosse corrotta in scambio suo lì proprio, o lì vicino: eppure non si vede che ci manchi nulla.

MA. Ti par egli ch'e' ragioni come i matematici? Oh senti, la è tanto senza capo nè coda, che non posso stare zitto. Poniamo che un po' di Cielo qui, e un altro poco lì, si siano combinati in uno: s'accorgerà egli dove ne manchi? quando si fanno le nuvole e le pioggie, dove si vede il segnale che siano state tolte per metterle insieme? Or veniamo alla stella: dove s'è mai diradata l'aria, poichè egli vuole che la sia generata proprio lì? E poi s'immagina egli (sarebbe proprio da dirla al prete), che tutte le stelle che sono in Cielo le si possano vedere? e' non è possibile. E per giunta chi mi tiene ch'io non possa dire che tre o quattro, e anche più, stelle, di quelle minori, che non si vedevano, si siano ammucchiate e così le hanno fatto questa bella grande? Non potrebbe anco essere che la si fosse generata nell'aria, e poi che sempre più la si fosse alzata? Ma non voglio dire queste cose, perchè la non è mia professione, non intendendomene: basta, che neanche lui ragiona a dovere.

NA. Eppure egli vuole che questo sia il nervo della ragione d'Aristotele.

MA. Dunque, essendo così misero il nervo, tutto il suo generamento e corrompimento andrà in brodetto.

NA. Se i nervi sono così deboli, la carne sarà frolla bene. Egli dice che s'e' si potesse generare in Cielo delle stelle nuove, e' bisognerebbe che da tanti secoli in qua se ne fosse corrotta qualcuna di quelle che sempre mai sono state viste: che sono... non mi ricordo quante. Basta, le son parecchie, e non ne manca proprio nessuna, chè e' lo dice Aristotele.

MA. Poffare! questa poi stringe bene senza zeppe. Chi diamine gli ha detto che questa stella nuova sia una stella stella? Ella è bensì uno splendore, ma non una stella. E anch'io l'ho insin a qui chiamata stella, perchè sebbene la non sia, pare una stella come sono le altre.

NA. Che è ella dunque?

MA. Che so io? Basta che la non è una stella propriamente: e le altre stelle non si sono mai corrotte, perchè sono stelle, e il Cielo n'ha bisogno, de' fatti suoi: ma non di questa che, essendo venuta, l'è anco di dovere che la vada via. E in quanto al dire che non si sono mai vedute stelle a corrompersi, rispondimi un po'. La terra (che è minore delle stelle) s'è ella mai tramutata, tutta in una volta?

NA. Oh, coppe e danari! se la terra si cambiasse a questo modo, non s'andrebbe tutti a catafascio?

MA. Lo credo, io! Invece, la cosa avviene a poco poco, e così potrebb'essere ch'e' avvenisse anche delle stelle, che sono stelle. Pure i' domanderei volentieri a quello del libricciuolo, o come sa lui che nessuna stella non si sia mai corrotta a un tratto? chè quanto al dire che non c'è mai stato uomo, che se ne sia addato, e che e' l'ha detto Aristotele, le mi paion novelle, a me.

NA. Egli dice che se questa stella fosse in Cielo, tutta la filosofia naturale sarebbe una baia: e che Aristotele tiene, che aggiungendosi una stella in Cielo, questo non potrebbe muoversi.

MA. Canchero, l'ha avuto torto questa stella a rovinare così la filosofia di costoro. S'io fossi in loro, i' la farei citare davanti al Podestà, la farei, e le darei una bella querela di turbato possesso, e spiccherei una cedola reale e personale contro d'essa. perchè l'è, cagione che il Cielo non si muove: e pure questo gli è manco male: chè e' ce n'è parecchi (ed anco de' buoni) i quali credono ch'e' non si muova.

NA. O sentine un'altra. Con che ragione (dice lui) quel Cielo di sopra gli è da meno degli altri? ché e' verrebbe a esser da meno, essendo corruttibile e nascendovi delle stelle nuove, e non negli altri che sono più bassi.

MA. Canchero Betta! da quello agli altri e' c'è differenza, quanto a più grande, più che non è dal monte Rua a un grano di miglio; e per giunta, essendo esso così grande, e' può avere dell'altre stelle di nuovo; ma non questi altri, ch'e' n'hanno assai d'una per uno: e poi se ci nascesse anche in quelli qualche stelletta, s'immagina egli che tutti la vedrebbero di botto? Oh l'è cottoia!

NA. E' dice che, per fare il mondo perfetto, bisogna che ci sia

qualche cosa ingenerabile e incorruttibile; e questa la non può essere altro che il Cielo.
MA. Il Cielo? o perchè proprio il Cielo? E io dirò che il Paradiso, che è sopra il Cielo, è desso, così puro come dice questo dottore.
NA. La gli pare una cosa impossibile che una stella così stragrandissima possa a un tratto sbucar fuori, così in un battibaleno.
MA. Ed a me no. Quando una vacca fa un vitello, nel momento che gli è appena nato, gli è più grande di un agnello che sia cresciuto fino in cima. E perchè mai? Perchè la madre del vitello è di un bel pezzo più grande che non è una pecora. Fa' pure il tuo conto che questa stella rispetto a tutto il Cielo non viene a esser niente più di quello che sarebbe un leone o un elefante rispetto alla terra; ti pare egli dunque che la sia una gran meraviglia?
NA. Ma se la è così, o come mai cala ella, invece di crescere, la stella, adesso?
MA. Io, per me, credo che la vada sempre più in su, e che e' paia che la cali perchè la s'allontana.
NA. Piano; chè il libricciuolo dice che i primi giorni che la si vedette la crebbe un bel po'. Se andasse in su, e' non potrebbe stare, perchè la sarebbe sempre calata.
MA. Allora quello dal libricciuolo doveva essere senza occhiali. Perchè, per me, io so che la prima volta che la vidi la mi parve grandissima, e che sempre la è calata, per mò di dire, di grandezza. Ma queste ragioni non mi persuadono: e lo dico perchè colui dal libricciuolo va troppo fuori di strada; e sì che vorrei tenerlo in carreggiata.
NA. Or bene, senti anche questa. E' dice che non si può generar niente nel Cielo, perchè (dice lui) e' bisognerebbe ch'e' ci fossero dei contrari, e che e' non ve ne può essere, sendo che l'è una quinta sommanza o sostanza, che so io?
MA. Oh! sì, cipolle! Le son di quelle botte da Aristotele e compagnoni suoi, queste, che non sanno s'e' sian vivi, eppure e' vogliono ragionar del Cielo. Io credo che in Cielo ci sia nè più nè meno caldo e freddo, e molle ed asciutto, com'è anche qui da noi. Perché, o non si vede ch'e' ci è dello spesso e del rado, e del lucente e dell'oscuro? Che è egli ciò? o non sono tutti l'uno all'incontrario dell'altro? sì o no? Ma vuoi di più? Questa stella ci poteva essere, eppure non c'era, e poi adesso la c'è. Non è il rovescio, questo? Ma lui apre la bocca, e lascia venir fuori quel ch'e' vuole. E poi, e' fa conto di disputare con i matematici, sciorinando di queste ragioni? O dove mai ha egli trovato che un misuratore vada speculando su queste novelle? Chi gliel'ha detto a lui?
NA. Oh canchero, ma e' ci aggiunge che se in Cielo vi fosse terra, acqua, aria e fuoco, e' non ci si potrebbe vedere attraverso come si fa, sendochè e' diventerebbe spesso e scuro.
MA. Sì, se quegli elementi fossero della fatta dei nostri; ma essi sono più perfetti, secondo che ho sentito una volta dire al mio padrone, il quale diceva che lo diceva Platone.
NA. Egli dice anche, che a questo modo il Cielo non potrebbe muoversi in giro, sendo che gli elementi vanno tutti in su o in giù, ma non attorno.
MA. E se io dicessi all'incontrario che e' vanno anche attorno? E sì che mancano letterati, i quali dicono che la terra gira torno torno come una macina da molino! Pensa, poi tu degli altri: quando si tratta di discorrere, tutti sanno discorrere.
NA. E' dice poi che la stella è vicino alla Luna, ma di sotto: e che lì e' non vi può esser fuoco.
MA. Ha fatto bene a dire che non c'è fuoco, per più ragioni.
NA. E così egli tiene che sia aria quella che lecca il culo (i' volsi dire il Cielo) della Luna.
MA. Eh, eh, e' poteva ben dire anche questa, sì.
NA. E (dic'egli) il Cielo non può essere di fuoco, perchè essendo così grande, e' brucerebbe tutti gli altri elementi.
MA. Oh che mi venga il morbo, se costui, dottore com'è, cavandosi la vesta, non sembrerebbe un uomo come un altro: dimmi un po': una sola favilla non basterebb'ella ad accendere un

Filuorico? c'hà da fare la sò filuoria col mesurare? No seto, que on zauattin no pò faellar de fibbie? El besogna crere a gi smetamatichi, que gi è pertegaore de l'aire, segondo, che an mi a pertego le cãpagne, e si a posso dire, a rason, quanto le xè longhe, e larghe, e così an iggi. NA. El disea ben aponto quel librazzuolo, che i Smetamatichi crè, que la sippia elta de belo; ma che i no l'intende. MA. mo per que no l'intendegi? me truognelo, o me falo l'amore? NA. El dise, que i s'imaghina, che'l Cielo sea scorrottibele, e zenderabele in quãto a on puoco a la botta, se miga el no poesse zenderarse, e scorromperse tutto in t'un fiò. que sigi mi? MA. On faellegi de ste reson i smetamatichi an? S'i stà lome su'l mesurare, que ghe fà quello a iggi se'l suppie zenderabile, ò nò. Se'l foesse an de Polenta, no poraegi ne pì, ne manco tuorlo de smira? mo el me fà ben da rire, con ste suò sbagiaffarì. NA: Mo l'è bella, que el dise conse de sta fatta in purassè luoghi de quel

Cap. 2.
Cap. 4.
Cap. 4.

pagliaio? e poi anche a bruciare quanto mai legname si trova?
NA. Lo credo, io.
MA. Eppure quante fornaci c'è al mondo, le non potrebbero bruciare uno zecchino che fosse d'oro. Perchè dunque? lo sai perché? Gli è perchè l'oro non si può bruciare. E così pure se gli altri elementi potessero bruciarsi, basterebbe un po' di fuoco per far l'effetto, senza che ne occorra tanto come dice lui.
NA. La va co' suoi piedi, quanto a quello; ma credi poi tu fermamente che il Cielo sia fuoco?
MA. Io non dico così, io. Gli è che il dottore grida Accorr'uomo, senza proposito: e le dice, là, senza mettervi su nè olio nè sale.
NA. Sta' a sentire quest'altra, che la non è mica da meno, no. E' dice che i matematici hanno dei buoni strumenti e dei sodi argomenti; ma che non li sanno adoperare.
MA. O in che modo se n'è egli accorto lui? Sarebb'egli mai fratello della torre del Bo? Dammi retta. Se un matematico verrà qui, e ti dirà: Natale, i' vo' saperti dire quanto c'è per aria da questo noce all'argine; e lo misurerà co' suoi arnesi senza muoversi; e quando l'abbia misurato e ch'e' te l'abbia detto, anche te tu lo misurassi con un filo, o in qualche altro modo, e tu trovassi che l'è così, non crederai tu ch'egli adoperi bene gli arnesi suoi?
NA. Ma io sì; e che vuol dire?
MA. Perchè dunque quando e' misura una stella (per modo di dire), vogliamo dire che e' non lo sa fare? E poi se e' sbaglia, ch'e' sbagli di millanta e di milioni di miglia? Se e' dicesse d'un po', come sarebbe a dire quattro dita, o una spanna, starei zitto; ma di tanto? l'è troppo grossa.
NA. Sai tu poi, che ragioni dei matematici e' viene a contare?
MA. Di' su.
NA. Una l'è di tagliar via (dice lui) un pezzo d'un cerchio, e che la stella così non la possiamo vedere per più di mezz'ora: e un'altra, di andarle sotto a piombo, camminandole in direzione per ventidue miglia. E così egli dice che non fanno a proposito, sendo che

rale serae na bagia; E que Stotene tèn, que arzonzantose na stella in Cielo, no'l porae muouerse. MA. Cancaro, l'hà bio torto sta stella, a deroinare così la filuoria de questoro. s'a foesse in iggi a farae cetarla denanzo al Poestò mi, e si a ghe darae na quarela de pussession trubata, e si a torrae na cedola reale, e persona le incontra de ella, per que l'è casòn, que el Cielo no se muoue; tamentre questo l'è manco male; che el ghe n'è paricchi (e an di buoni) que crè, che'l no se muoua. NA. Mo n'altra. con que reson (diselo) quel Cielo de fora xelo da manco de gi altri? que el vegnirae a esser da manco, sipiando scorrottibele, e nassandoghe de le stelle nuoue, e nò in gi altri, ch'è pì bassi. MA. Cancabaro, da quello a gi altri, el gh'e defenientia, per conto de maore, pì, che n'è dal monte de Rua a on gran de megio; e perzontena ello sipianto sì grande, el pò haere de le altre stelle da nuouo; mo nò sti altri, que gi hà assè de vna per vno, e pò se'l ghe nascisse anche in iggi qual che

cap. 4.
Coperni-co, &c.
cap. 4.

Le pagine originali del *Dialogo* sono tratte dalla riproduzione anastatica realizzata nel 1992 da Edizioni Centro a cura di Giampiero Bozzolato.

NELLA LINGUA DI RUZANTE

Poche righe dell'originale bastano ad assaporare il tono del dialogo galileiano. Quelle che seguono sono relative alle prime battute della discussione tra Natale e Matteo, e corrispondono all'inizio della seconda colonna a p. 74.
NA. Mo n'heto vezù quella Stella, che sberlusea la sera zà tri misi, que la parea n'ogio de zoetta? e si adesso la se vè la mattina con se và a bruscare, que la fà on spianzore beletissemo? no t'acuorzito, che la xè vegnua da fresco? e que no la s'ha vezua mè pì inanzo d'adesso? mo l'è ella cason de ste smeravegie, e de sti sicchi, segondo, che dise on dottore da Pava.
MA. Ch'in seto tì, que la no s'habbie mè pì vezua?
NA. A sentì l'altro diazzo uno, che lezea on certo slibrazzuolo, e si el disea, que la se scomenzè a desfegurare lomè a gi otto del mese d'ottubrio passò. E si quel librazzuolo el l'haea fatto on lettran da Pava, che'l contava pò assè conse.
MA. Doh cancaro a i scagarieggi da Pava, fuossi, per che questù no l'ha vezua ello, el vuole, che tutti ghe cherza, que mè pì la no ghe suppi stà? Gnan mi a n'hò mè vezù le Toescarie e si le ghe xè.
NA. Mo pre conto de quello, el me par pure an a mi, che la sea nuova.

gli è da mostrare che la stella sia più in su di dieci miglia; e sì anche dic'egli che l'è un bel pezzo più alta.
MA. Canchero, costui è acuto dalla parte grossa! Ma s'egli crede, questo cristiano, che la stella vada più in su di dieci miglia, e ne dice anche quelle ragioni, gli è segno che le non hanno che fare con lui: perchè dunque metterle sul suo libricciuolo, e poi dire che le non sono a proposito? Queste ragioni le furon fatte (per quanto dicevano a Padova già parecchi giorni) contro un maggiorente de' filosofi d'Aristotele, il quale allora teneva duro e fermo che la non era più alta di dieci miglia; e per giunta costui dal libricciuolo doveva lasciarle stare queste ragioni, chè non gli davano fastidio.
NA. Or bene, ce n'è più? disse colui che castrava i porcelli. Altro che ce n'è! Nespole! e' c'è un brutto intrigo di parallasse, e di vedere, e di Luna, che so io? Immaginati che colui che leggeva l'ha detta, e poi l'ha dichiarata più di tre volte, e pure nessuno l'intese.
MA. E' deve averla imbrogliata apposta lui, per darsi l'aria d'un uomo di gran levatura. E la sarà poi in tutt'altro modo; perchè io so ben io, che, quanto alla parallasse, e' non può aver ragione, perchè gli è un modo di misurare per aria troppo sicuro.
NA. Lasciami mo' vedere s'io me ne ricordassi un po'. Egli dice primieramente che non si può guardare attraverso una stella; e che stando così da lontano, e' non è possibile trovarle il mezzo, massimamente perchè l'è una cosa tonda; e che...
MA. Taci, taci un po', chè tu n'hai dette parecchie in un fascio. Chi è colui che creda di poter mirare attraverso a una stella, sendo che l'è tanto grossa? Che canchero di filastrocche si va egli a immaginare? ne sa egli di più belle? Questa sarà la prima. L'altra. o come troveresti tu meglio il mezzo d'un crivello: mettendoci gli occhi da vicino, o allontanandotene un bel poco?
NA. Ma, standogli da lontano; perchè s'io gli fossi vicino, i' non potrei neanco vederlo bene.
MA. Guarda ora dunque se l'è vera che non si possa trovare il mezzo delle stelle, perchè sono lontane? All'altra: in che daresti più sicuramente nel centro, con una occhiata: in quello d'una palla o d'un vomero?
NA. Canchero Betta! d'una palla: perchè quando l'avessi colta giusta in un punto, la sarebbe colta in tutti.
MA. Eppure lui e' dice all'incontrario.
NA. Egli vi aggiunge che sono (a nostro vedere) troppo piccinine per trovargli il mezzo.
MA. Sì? egli dice anco questa? e quattro dunque in un boccone. Dimmi un po' tu. Come potresti sbagliar più, a dar nel mezzo d'un fondo di tino, o d'un tagliere? io dico, a indicarlo.
NA. Caspita! i' potrei sbagliare d'un bel poco più nel fondo del tino, che nel tagliere.
MA. Eppure il buon dottore del libricciuolo dice all'incontrario. O séguita pure di questa parallasse.
NA. Gua', non potendosi vedere attraverso le stelle, non si può sapere i dove le siano (dice lui), perchè non gli si vede il di dietro.
MA. Se tu mettessi il tuo gabbano sopra un gradino della mia scala a mano, e ch'e' lo nascondesse tutto, sapresti tu trovarmi su quale e' fosse?
NA. Poh. ci vuol di molto! i' comincerei a contare uno, due, tre insino a che fossi lì, e quando avessi detto, come sarebbe a dire, nove, e ch'i' vedessi che in su quell'altro ci fosse il gabbano, i' direi che gli è sul decimo, io. La non è così?
MA. Eh la non può essere altrimenti, lei: e così pure si viene a fare nel Cielo, sebbene quel letteratello non se ne sa capacitare. Ma sai che gli è più grosso che non è il torrazzo di Cremona, che dicono che gli è così grandissimo.
NA. Ma quando guardiamo nella Luna, la nostra vista vi si ficca dentro (dice lui) e quindi non si può fare la parallasse.
MA. Che mi ficchi lui... (l'ho quasi detta): noi vedremmo le stelle di sopra, ch'e' sarebbe un piacere, se la fosse così.
NA. Piano, chè non vorrei scambiare. E' mi par pure ch'e' dica

che non si può vedere mezza la Luna e neanche mezze le stelle, sendochè le sono grandi, ed il nostro raffiguramento coglie troppo stretto, sebbene e'si va poi slargando.
MA. Mio Dio, fa' conto, che, chiappala da che parte tu vuoi, appiccica. Che m'importa a me se io non posso vedere tutta la Luna e neanche tutta una stella? Non basta ch'i' la vegga un poco, e che secondo quello i' la misuri?
NA. Oh, a questo modo, l'è una baia, là, questa. Il fistolo! e poi si faceva bello d'aver trovato una speculazione sottile da tenere a segno i matematici.
MA. Ma sai che l'è una cosa che non c'è mai stato pensato? Oh, per la madre dei cani, che perfino un Vitello l'ha saputa prima, secondo ch'io ho sentito dire assai volte al mio padrone; eppure non se n'è tanto tenuto.
NA. Vuo' tu che andiamo innanzi?
MA. Sì, dì!
NA. Fratello, tu ti saresti scompisciato dalle risa, se avessi sentito un tafferuglio, che c'è di A, B, N, O, che so io? basta, e' voleva asserire che la parallasse è buona, ma i matematici non la sanno adoperare in modo che vada bene.
MA. E' non deve capire neanche egli ciò ch'e' dice. O tirati un po' in qua: vedi tu questo salicetto che è vicino a questo fossato?
NA. Io sì.
MA. Vedi poi quella pioppa ch'è lì vicino all'argine?
NA. Quale, la grande o la piccola?
MA. La piccinina.
NA. Sì, ch'i' la veggo.
MA. Or bene, o guarda ben diritto; quale de' due ti pare che sia a destra, il salicetto o la pioppa?
NA. Stando così, e' mi pare che la pioppa verrebbe ad essere a destra.
MA. Tirati ora da quest'altra parte.
NA. I' vengo.
MA. Fermati qui. E adesso?
NA. Oh canchero Betta! a questo modo, il salicetto sarebbe lui a destra, e la pioppa a sinistra.
MA. O che t'importa a te, se tu non vedi attraverso nè al salice, nè alla pioppa? E che danno te ne viene, perchè tu non puoi vedere anche la parte di dietro di tutt'e due?
NA. Ma niente, perchè io guardo secondo gli orli delle cortecce, io, e non secondo quello quel ch'i' non veggo.
MA. Così si fa, vedi, anche per aria, e questa è una sorte di parallasse. Torna ora qui dove sono io.
NA. I' ci son venuto.
MA. Guardando di per la cima a questo salicetto, puoi tu vedere quella pioppa che ti diceva, sebbene la sia pel suo mezzo?
NA. Lasciami mo' guardare. Pu, uh! ma io no.
MA. E se tu fossi tanto lontano, che guardando sopra alla cima del salicetto, tu credessi mirare diritto a metà, e tu non t'accorgessi di alzare gli occhi, quale diresti che fosse più alto di questi due?
NA. Aspetta ch'i' pensi un poco. I' direi, io, senz'altro, che la pioppa fosse più bassa, e il salicetto più alto; perche e' mi parrebbe così, anche ch'e' non fosse vero.
MA. Fa' un po' un'altra cosa. Sali su questo noce, ch'io t'aiuterò.
NA. Che vuo' tu fare?
MA. Va' su, e poi tu sentirai.
NA. I' ci andrò, dacchè tu vuoi così.
MA. Adagio, che tu non ti faccia male.
NA. Pover'a me! e' mi son quasi portata via un'unghia e sbucciato un ginocchio.
MA. Ci sei ancora ben saldo?
NA. Io sì. E ora che c'è?
MA. Torna a mirare quella pioppa, che tu guardavi anche di quaggiù sotto.
NA. E poi?

STANZE
D'INCERTO
CONTRA ARISTOTELE.
PER LA STELLA
Nouamente apparsa.

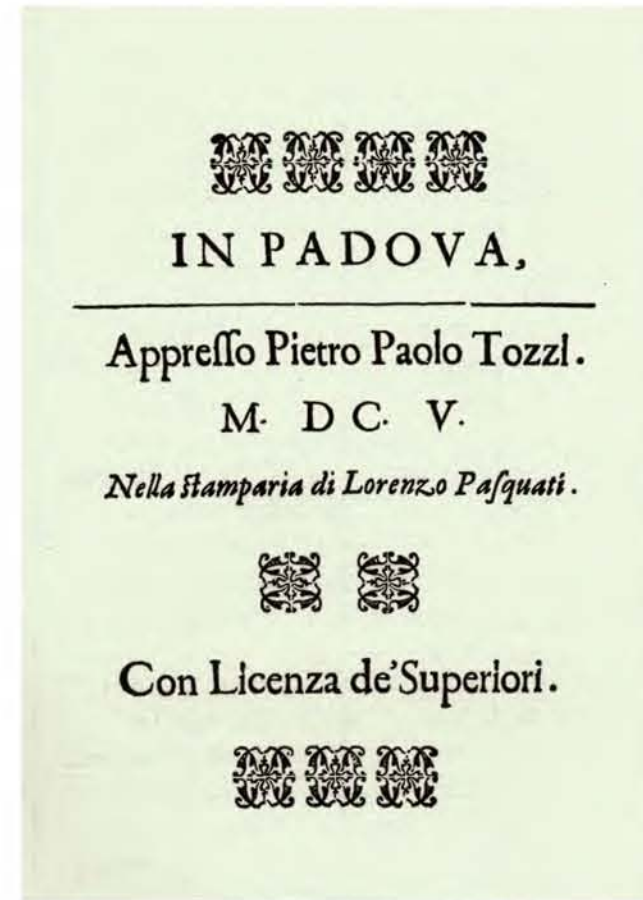
CHE più vaneggi, o Stagirita stolto,
E puro il Cielo, e ingenerabil credi?
Stella noua in lui fissa, il chiaro volto
Discopre scintillando, e non la vedi?
O, più che mai, nè primi errori inuolto,
Il senso neghi, ed' altre proue chiedi?
Il senso neghi, onde i principij certi
Dicesti hauer de le scienze aperti?

E Ma,

MA. Mirando a quella in dirittura, puoi tu vedere questo salicetto come tu facevi essendo di sotto?
NA. Ma io no: eppure se io fossi da lontano così in alto, io per me direi che il salicetto fosse più basso.
MA. Vieni dunque giù, che te ne conterò di belle.
NA. E' e' è poca fatica a saltar giù.
MA. O sentimi: perchè, quando tu eri abbasso, il salicetto ti pareva più alto della pioppa, ed essendo sul noce e' ti pareva all'incontrario, per ciò anche questo è un altro modo di parallasse: chè parallasse vien a dire, come sarebb'a dire, differenza di mira. Fa' ora il tuo conto, che se tu andassi su quel gelso che è là, il salcerello ti parrebbe più basso della pioppa e a destra; e se tu tornassi poi da quest'altra parte, il salicetto ti verrebbe a parere più alto della pioppa e a sinistra: e anche questo è un altro modo di parallasse, secondo che mi dichiarò una volta il mio padrone. L'intendi tu ora?
NA. Caspita, ma la è più chiara di un graticcio da vacche. Io mi meraviglio in che modo colui dal libricciuolo non abbia saputo ragionare se non d'una specie di parallasse, essendocene tre.
MA. Sarebbe stato anche troppo, se egli ne avesse ragionato come si deve. Or bene, fa pure il tuo conto, che se la Stella nuova e la Luna ci fossero vicine com'è questo salicetto, in proporzione le stelle di sopra ci sarebbero d'un bel pezzo più lontane che non è quella pioppa. E sarebb'egli possibile che non ci fosse fra gli Spagnuoli e i Tedeschi e i Napoletani differenza di visuale? Eppure tutti la vedono nel medesimo luogo, vicino a quelle stelle che le chiamano Quel della balestra, o Quel che ci saetta col bolzone: che so io?
NA. Ma il tuo ragionamento non vale, perchè non è possibile sapere quanto sia lontana la Luna: e lo dice anche colui dal libricciuolo.
MA. Non si può saper no, al modo suo, ma i matematici sanno ben trovarlo essi.

IN PADOVA,

Appresso Pietro Paolo Tozzi.
M. DC. V.
Nella stamparia di Lorenzo Pasquati.

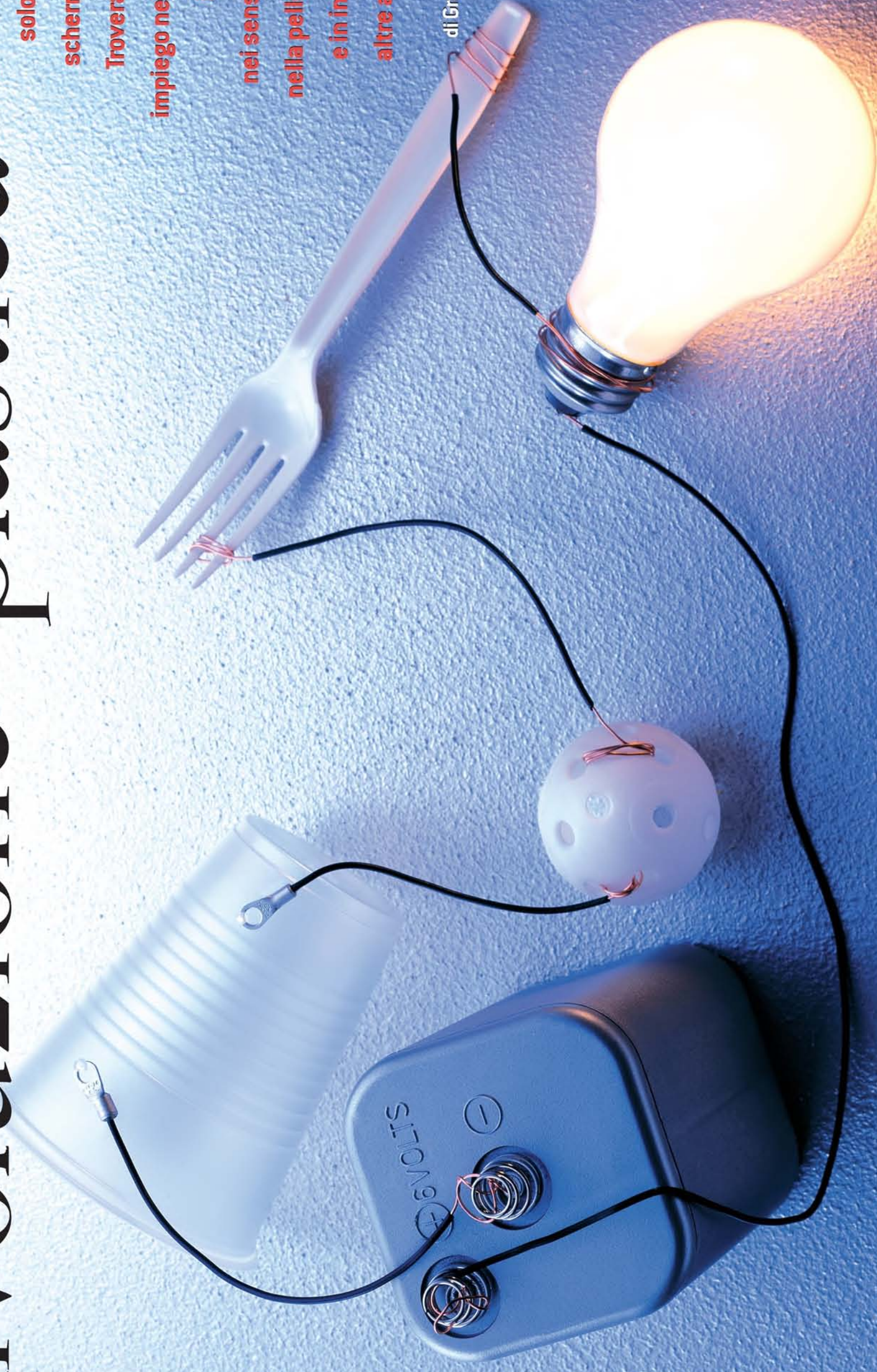
Con Licenza de' Superiori.

NA. Io non so che dirti, se non che tu hai ragion da vendere.
MA. Ma credi tu che colui dal libricciuolo direbbe così anche lui?
NA. S'e' lo dicesse e' farebbe bene, ma e' potrebb'essere tanto capone, da tener duro: diciotto di vino.
MA. Ch'e' tenga pur saldo, e lo metta a mio conto.
NA. Io non so poi, come sia stato possibile ch'e' dica, quest'altra, che tu sentirai adesso. O che non dice egli, che in nessun luogo, salvo dove ci è sopra in dirittura e a piombo, non si può fare il capanniscondere del Sole? I' l'ho pur veduta, io, che lo so.
MA. Quest'ottobre che viene (se i corvi non gli mangiano gli occhi) e' si potrà chiarire, chè, per quanto i' ho sentito dire, e' si farà. Ma con che ragione parla egli a questo modo?
NA. La Luna si va voltando (dice lui); e così la non si può vedere direttamente, se non quando l'è in Zenith.
MA. Torna mo' a dire.
NA. E' dice lui che non essendo la Luna in Zenith, la non può nascondere tutto il Sole.
MA. Ma che diavolo! questo pover'uomo si crede che la Luna sia una frittata. Cancheruzzolo! che essendo ella rotonda, quelli che stanno in Zenith o che ne possono vedere più di noi? Ce n'è altre?
NA. Sì. Che vuol dire Grassalia?
MA. Come Grassalia?
NA. E' dice lui che l'è una nuvola a mo' di latte, vicino alla Luna, e che la non è altrimenti in Cielo.
MA. Oh oh, i' t'intendo adesso. L'è la Strada di Roma.
NA. Ah, sì, sì, la Strada di Roma.
MA. E così, e' dice che la non è in Cielo?
NA. Ma no, dice lui.
MA. Oh canchero Betta! ma e che gli diremmo dunque noi Strada di Roma, che vuol dire Strada del Paradiso, se la non fosse lassù?
NA. Vedi tu! E così egli fa poi delle bravate contro un filosofo (e anche proprio delle de' vecchi) che non credeva che la fosse in Cielo, perchè e' lo diceva Aristotele che la c'era.
MA. Orsù, andiamo verso casa, che l'è sera; in ogni modo e' possiamo pur ragionare anco camminando.
NA. Va' pur innanzi, ch'io vengo. Eh, e' ce n'è ancora un po'! E' dice che la stella nuova la trema perchè, quando gira, si va sventolando.
MA. Che glielo credi tu?
NA. I' glielo crederei, se non ce ne fossero parecchie delle stelle che girano, eppure non tremano mica. Anzi e' tremano soltanto quelle che sono alte alte, perchè e' non possiamo affissarle bene: e anche questa, tremando, la dev'esser lassù.
MA. Va' là, che tu sei un Orlando.
NA. Mentre che, non sapendo costui dove la sia questa stella, e' non può neanco sapere come la sia generata, e così le vengono a essere tutte filastrocche quelle ch'e' dice a questo proposito: non è vero?
MA. Ma, e' bisogna bene che la sia così.
NA. Or bene, io voglio che ci pigliamo un po' di spasso con questi suoi prognostichi, i' voglio.
MA. Sì, che dic'egli?
NA. E' dice che la stella durerà assai assai, se non s' imbatte che il Sole non la disfaccia, dice.
MA. E' poteva anche dire, che la durerà fin a che va a romperla lui: in ogni modo, quando la se ne sia andata, egli potrà sostenere che è stato lui che l'ha rotta.
NA. Oh che gli venga il fistolo! questa sarebbe proprio da porci. E' dice poi ch'e' sarà abbondanza d'ogni cosa, e che l'è una stella di quelle buone.
MA. Infin a qui la va bene, quanto a quello; ma se si durasse con questi asciuttori, a che si sarebbe? Credila pure a modo tuo.
NA. O degli uomini poi? quel po'!
MA. Come sarebb'a dire?
NA. Sarebb'a dire, ch'e' diventeranno ingegnosi e sapienti, e ch'e' si terranno alla verità.
MA. Tu vedi che il prognostico s'è dimostrato in lui. Non vedi tu come gli è fino? È impossibile ch'e' campi, avendo tanto cervello da giovane.
NA. Tu mi dai la berta, non è vero? Di' piuttosto che il prognostico è stato vero in noi, che ci siamo tenuti alla verità, sebbene egli voleva acchiapparci.
MA. Tira innanzi ch'hai buon vento.
NA. E' dice poi anche che questa stella caccerà via le furfanterie, le rabbie: che so io?
MA. Sì, sì, così non andassero per la peggio i nostri affari; ma io non mi meraviglio de' suoi prognostichi, perchè tutto il suo libricciuolo mi pare un prognostico e che e' tiri sempre a indovinare.
NA. Appunto, e' dice che n'ha un altro in latino da fare stampare.
MA. Ch'e' faccia presto, perchè, essendo vicina la quaresima, e' sarà buono a qualche cosa anche quello, come ci ha fatto ridere questo adesso, che è di carnevale.
NA. E colui che leggeva disse ch'e' credeva propriamente ch'e' l'avesse fatto stampare per venderlo e guadagnarsi qualche soldino.
MA. Ch'e' lavori dunque a spacciarli; e se glien'avanzasse qualcuno, che ne faccia un rinvolto, e ch'e' se lo cacci dove Tofano si cacciò le spezie, ch'e' sarà ben adoperato.
NA. Lasciamola lì. No' siamo a casa. Vuo' tu stare a cena con me? te ne darò volentieri, sai.
MA. Lo so; ma i' non posso, perchè la Menica m'aspetta: tuttavia i' te ne ringrazio.
NA. Addio, dunque.
MA. Addio.

IL FINE

Rivoluzione plastica

I semiconduttori organici non servono solo a costruire schermi flessibili. Troveranno presto impiego nei dispositivi indossabili, nei sensori chimici, nella pelle per i robot e in innumerevoli altre applicazioni

di Graham P. Collins

Leonard Gertz

Economiche, resistenti, leggere e flessibili, le materie plastiche hanno acquisito negli ultimi anni un altro attributo: la capacità di funzionare come semiconduttori, formando diodi e transistor. Ora, mentre i primi prodotti di elettronica plastica stanno arrivando sul mercato, sotto forma di schermi a LED organici, si prepara una nuova era elettronica basata su polimeri. Forse le plastiche non uguaglieranno mai le capacità di calcolo e miniaturizzazione del silicio, ma potrebbero trovare applicazioni a cui il silicio non può aspirare: economiche etichette di identificazione a radiofrequenza, hard disk di grande capacità, schermi a basso costo, magari usa e getta, da arrotolare come carta, e computer indossabili. Altre applicazioni comprendono fotocellule, sensori chimici e materiali sensibili alla pressione.

Un vantaggio chiave dei transistor plastici rispetto a quelli in silicio è la facilità di produzione. Allo stato dell'arte, costruire chip di silicio richiede settimane di lavoro e procedimenti complessi e costosi, come la fotolitografia e la deposizione in vuoto: processi che si devono svolgere ad alta temperatura e in camere ultrapulite. Al contrario, i transistor plastici possono essere prodotti con procedimenti più veloci ed economici in condizioni meno controllate. Infine, è anche pensabile un processo di produzione simile alla stampa continua che ha rivoluzionato l'editoria.

Semiconduttori organici

Le plastiche conduttrici usate in elettronica possono essere suddivise in due ampie categorie, una fatta di piccole molecole e l'altra di lunghe catene di polimeri coniugati. Un esempio del tipo a piccole molecole è il pentacene, costituito da cinque anelli di benzene uniti in una linea. I polimeri sono invece catene de centinaia o migliaia di atomi di carbonio «coniugati», ossia uniti alternatamente da legami singoli e doppi. Anche un anello di benzene può essere pensato come una breve catena di sei atomi di carbonio, con legami alterni, che si morde la coda a formare un anello chiuso. Ma questa descrizione a legami singoli e doppi alternati non è accurata, perché alcuni legami doppi sono «delocalizzati», cioè condivisi da vari atomi. La delocalizzazione è un fenomeno simile a quanto avviene nei metalli e nei semiconduttori. Gli elettroni delocalizzati possono esistere solo in stati che hanno specifici livelli energetici e le energie permesse formano bande che possono contenere solo un certo numero di elettroni. La più alta banda di energia contenente elettroni è chiamata banda di valenza, e quella immediatamente successiva banda di conduzione.

Le molecole piccole, come il pentacene, sono buoni conduttori nel loro stato puro e con esse si possono produrre direttamente cristalli o film sottili da usare nei dispositivi. I polimeri lunghi, al contrario, nel loro stato puro sono cattivi conduttori. Ciò avviene perché la loro banda di valenza è piena di elettroni, che ostacolano il flusso della corrente. Ciascun elettrone della banda non ha un posto dove andare – non ha stati vuoti in cui portarsi – e gli spazi disponibili nella banda di conduzione hanno un livello di energia troppo alto per poter essere sfruttati.

Per ovviare a questi problemi, i ricercatori introducono speciali impurità atomiche, i «droganti». Gli atomi droganti possono aggiungere elettroni, che finiscono nella banda di conduzione, o rimuoverne dalla banda di valenza, creando lacune, che si comportano come cariche positive. In entrambi i casi, la corrente può scorrere facilmente, o per mezzo di elettroni che si muovono nella banda di conduzione, praticamente vuota, o per mezzo di lacune che si muovono nella banda di valenza (per una lacuna, la banda di valenza è praticamente vuota: ogni elettrone rappresenta un posto dove la lacuna si può muovere).

La possibilità di drogare in questo modo polimeri coniugati per creare materiali conduttori o semiconduttori fu scoperta negli anni settanta da Alan J. Heeger (ora all'Università della California a Santa Barbara), Alan G. MacDiarmid (ora all'Università della Pennsylvania,) Hideki Shirakawa (ora all'Università di Tsukuba), che per la scoperta si videro assegnare il premio Nobel per la chimica nel 2000. Nel corso di vari esperimenti, drogarono il poliacetilene esponendolo a cloro, bromo e iodio.

Queste plastiche conduttive hanno già trovato applicazione, oltre che nei circuiti elettronici, come inibitori della corrosione, schermi elettromagnetici per circuiti, coperture antistatiche sulle emulsioni fotografiche e strati in grado di assorbire microonde per rendere gli aerei invisibili ai radar.

Macchine da stampa

Il metodo migliore per produrre dispositivi a base di semiconduttori organici è la deposizione da vapore, in cui il composto viene vaporizzato in una camera chiusa, sotto vuoto o riempita con un gas inerte, e lasciato condensare sotto forma di un sottile film su un substrato. Questa tecnica è simile a quella usata per produrre alcuni prodotti di uso quotidiano, come la copertura dei sacchetti di patatine, che impedisce all'ossigeno di diffondere attraverso la plastica.

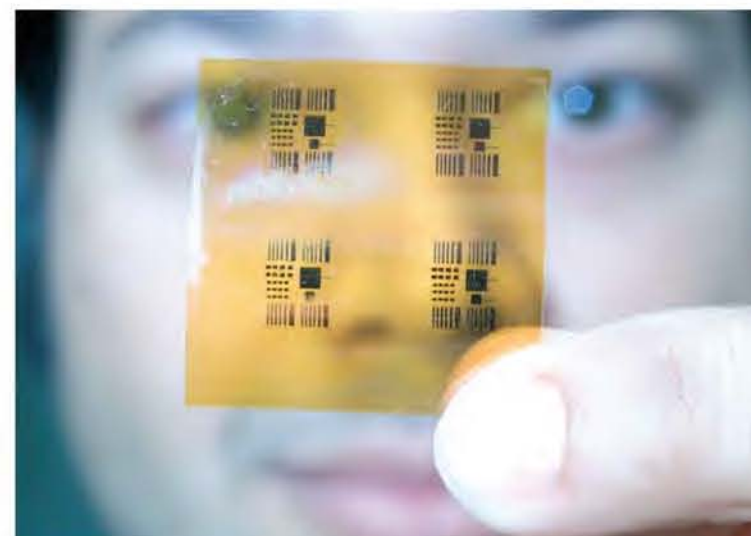
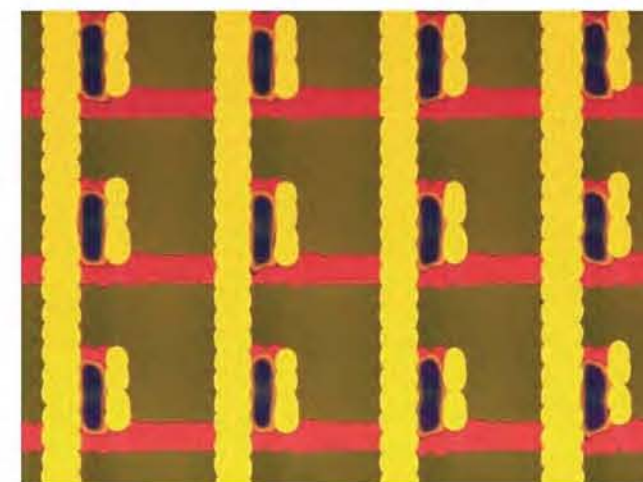
Per i polimeri ci sono varie tecniche di fabbricazione. Nel rivestimento mediante centrifugazione, una delle più diffuse, un disco con una goccia di una soluzione contenente il polimero, o i suoi precursori, viene fatto girare rapidamente, in modo da depositare uniformemente il materiale sulle superficie. Il materiale può poi essere inciso con tecniche fotolitografiche simili a quelle usate per i semiconduttori inorganici tradizionali, tagliato o stampato (alcuni ricercatori hanno usato questa tecnica anche con il pentacene).

Un problema dei polimeri conduttori, rispetto alle plastiche usate in altre produzioni industriali, è la mancanza di un solvente organico adeguato. Per esempio, i film di polietilenediossitiofene, o PEDOT, si ottengono a partire da una soluzione acida a base di acqua, le cui proprietà corrosive danno qualche problema. In aprile, la TDA Research di Wheat Ridge, in Colorado, ha annunciato una nuova forma di PEDOT, battezzata oligotrone, solubile in solventi organici non corrosivi. Esponendo il precursore liquido a luce ultravioletta, si favoriscono legami tra le molecole, trasformando il materiale in un solido insolubile. Così si dovrebbe riuscire a ottenere film sottili di oligotrone con il metodo della centrifuga, per poi creare gli schemi desiderati illuminandolo con radiazione UV attraverso un'opportuna maschera.

In alternativa, il materiale può essere depositato usando la stessa tecnologia delle stampanti a getto d'inchiostro, ma al posto dei pigmenti colorati vengono deposte sul substrato goccioline di soluzione polimerica con un elevato grado di accuratezza. Finora il procedimento è stato usato solo a scala macroscopica, come dimostrazione del principio, e non per realizzare dispositivi elettronici veri e propri.

Il trucco per rendere solubile l'oligotrone è stato quello di attaccare gruppi chimici idonei alla fine dei monomeri di PEDOT. In generale, potrebbero essere create varianti dell'oligotrone modificandone i gruppi terminali: per esempio, un oligotrone con gruppi fotovoltaici si potrebbe usare per produrre celle solari.

Molte aziende stanno adottando la tecnica del getto d'inchiostro per stampare circuiti. Il Palo Alto Research Center (PARC, in passato parte della Xerox) ne aveva dimostrato la fattibilità pratica nel 2003, realizzando la prima matrice di transistor a semiconduttore plastico prodotta interamente con questa tecnologia. Questi transistor sono più grandi di quelli al silicio, e commutano più lentamente, ma la loro mobilità – 0,1 centimetri quadrati per volt per secondo (cm^2/Vs) – è inferiore solo di un fattore 10 rispetto al silicio amorfo comunemente usato negli schermi a cristalli liquidi. (La mobilità è una misura della velocità con cui i portatori di carica, elettroni o lacune, si spostano nel materiale. Un fattore 10 è una differenza relativamente modesta, considerato che il silicio amorfo e quello cristallino, decisamente migliore, sono separati da un fattore 1000.)

La velocità di commutazione del più lento dei semiconduttori organici è più che adeguata al controllo di un monitor

UNA MATRICE DI TRANSISTOR PLASTICI è stata realizzata con la tecnica della stampa a getto d'inchiostro presso il Palo Alto Research Center grazie a un inchiostro polimerico semiconduttore prodotto dallo Xerox Research Center of Canada. Questi transistor sono usati negli schermi a matrice attiva e nella carta elettronica.

IN SINTESI

- Finora le materie plastiche hanno formato lo «scheletro» e la «pelle» di molti prodotti, ma per avere un «cervello» bisognava affidarsi al silicio. Con l'avvento dell'elettronica a base di sostanze organiche le cose cambieranno.
- I chip plastici forse non raggiungeranno mai le dimensioni e le velocità di quelli di silicio, ma la loro produzione con tecniche molto economiche, fra le quali la stampa a getto d'inchiostro, fa prevedere che invaderanno il mercato dei prodotti di consumo e degli elettrodomestici.
- Le potenziali applicazioni per questi materiali comprendono schermi per elettrodomestici e computer, carta elettronica, etichette di identificazione a radiofrequenza (RFID), elettronica indossabile, sensori chimici e una «pelle» per robot sensibile alla pressione.

Dow, Motorola e Xerox hanno formato un consorzio per sviluppare inchiostri polimerici e metodi di stampa, e lo stesso hanno fatto DuPont e Lucent Technologies, così come Universal Display Corporation e Sarnoff.

Al congresso «Society for Information Display» del 2003, la Plastic Logic esibì il primo schermo a matrice attiva stampato con tecnologia a getto d'inchiostro (in questi schermi ogni pixel è alimentato da un apposito transistor). Lo schermo – una matrice di 63 pixel per 48 su un substrato di vetro – misurava circa 2,5 centimetri quadrati e usava la carta elettronica della Gyricon, uno spin-off della Xerox. Plastic Logic e Gyricon stanno lavorando per aumentare le dimensioni dello schermo, migliorarne la risoluzione e passare a un substrato di plastica flessibile.

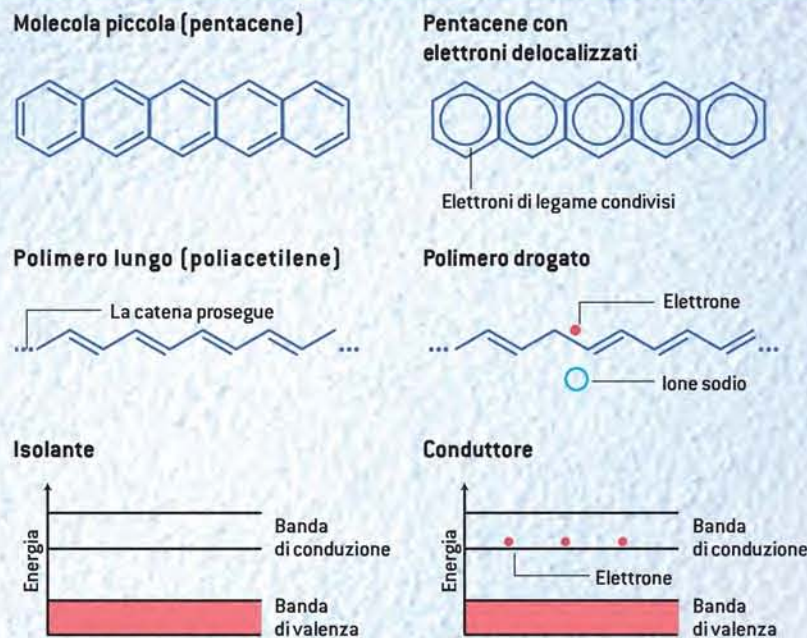
La stampa a getto d'inchiostro non può produrre transistor altrettanto piccoli e impacchettati quanto quelli dei migliori chip inorganici. A metà del 2003, con la litografia a fascio elettronico, un gruppo della Cornell University ha prodotto transistor di pentacene con una lunghezza del canale di soli 30 nanometri. Tentativi precedenti di produrre transistor a film organico sottile non erano riusciti a infrangere la barriera dei 100 nanometri, e i dispositivi più piccoli avevano prestazioni ridotte. La litografia a fascio elettronico è un processo costoso, che difficilmente sarà mai utilizzato per una produzione industriale, ma quantomeno si è dimostrato che è possibile produrre dispositivi piccoli e funzionanti.

Un altro svantaggio dei transistor organici è la mancanza di un materiale adatto a produrre transistor di tipo p e n su un unico chip, un prerequisito indispensabile per sfruttare la tecnologia CMOS (Complementary Metal Oxide-Semiconductor), che è una colonna portante dei microprocessori. (Nei semiconduttori di tipo p i trasportatori della corrente sono le lacune; in quelli di tipo n, gli elettroni.)

Inoltre, molti materiali polimerici sono fragili e facilmente danneggiabili dall'umidità o dall'esposizione all'ossigeno atmosferico. Problema che può essere superato «sigillando» i componenti attivi con strati resistenti all'aria e all'umidità, ma questa soluzione complica le fasi di fabbricazione e impedisce di ottenere qualità come la sottigliezza e la flessibilità.

Qualche progresso nello sviluppo di materiali più resistenti è

PLASTICHE CONDUTTRICI

I materiali grezzi per i dispositivi elettronici organici si dividono in due ampie classi: piccole molecole (*in alto*) e catene di polimeri coniugati (*al centro*); in entrambi i casi fra gli atomi di carbonio si alternano legami singoli e doppi. Gli elettroni dei legami doppi diventano in qualche modo delocalizzati, ossia condivisi fra molti atomi. Pertanto, gli stati consentiti agli elettroni formano bande su intervalli di energia (*in basso*). Le proprietà elettriche del materiale dipendono dal riempimento delle bande. I polimeri hanno una banda di valenza piena che li rende isolanti, come la maggior parte delle plastiche. Se vengono aggiunte sostanze droganti, però, gli elettroni aggiunti alla banda di conduzione o rimossi dalla banda di valenza permettono il passaggio di un flusso di corrente. Le molecole piccole sono invece semiconduttrici già allo stato non drogato.

già arrivato. In aprile Beng Ong, dello Xerox Research Center of Canada, ha annunciato lo sviluppo di un inchiostro al politiofene, che può essere usato per stampare circuiti in aria invece che in atmosfera inerte controllata.

Un altro ibrido organico-inorganico particolarmente resistente è stato sviluppato da David Bocian dell'Università della California a Riverside. Nel novembre 2003 il suo gruppo riferì che le porfirine, importanti molecole organiche, potevano essere legate alla superficie ossidata di un substrato di silicio e resistere così all'esposizione a temperature di 400 gradi per mezz'ora.

Un modo per evitare di danneggiare la fragile parte organica di un'apparecchiatura durante la sua fabbricazione è separare le sue fasi di produzione da quelle delle altre parti. Questa tecnica è stata descritta a marzo da John Rogers, dell'Università dell'Illinois, e dai suoi colleghi della Lucent e della Rutgers University. Essi hanno sfruttato la deposizione di vapore per realizzare sottili elettrodi d'oro su un substrato di gomma flessibile. Questo stampo è stato poi pressato su un grande cristallo di rubrene di alta qualità per formare un transistor. (Il rubrene è formato da quattro anelli di benzene in catena e altri quattro legati singolarmente come gruppi laterali, come due coppie di ali). In tal modo si risparmia al cristallo organico l'esposizione alle critiche fasi di deposizione degli elettrodi.

Il gruppo ha registrato i più alti tassi di mobilità mai visti in un transistor organico – fino a 15 cm^2/Vs – e la tecnica, sviluppata per scopi di ricerca, promette di avere applicazioni commerciali. Lo stampo può infatti essere rimosso e riposizionato per creare altri elettrodi. Cambiandone l'orientazione si è dimostrato che la mobilità dipende dalla direzione di spostamento lungo il cristallo, un effetto previsto da tempo ma mai dimostrato prima così chiaramente.

Schermi e RFID

In generale, i semiconduttori organici hanno una mobilità più bassa di quelli inorganici, che si traduce in una minore rapidità di commutazione. Si potrebbero raggiungere frequenze di clock fino a centinaia di chilohertz, ma non pensate di vedere presto chip organici da un gigahertz. Le velocità ottenute, tuttavia, sono già più che sufficienti per far funzionare uno schermo.

I primi prodotti dotati di rudimentali schermi a plastiche conduttrici sono già in vendita: per esempio una macchina fotografica digitale della Kodak con un monitor plastico di cinque centimetri e un rasoio elettrico della Philips che mostra la carica della batteria. Che siano organici (a piccole molecole) o polimerici (a grandi molecole), questi LED possono essere utilizzati come pixel di uno schermo in un modo che non è praticabile con i LED di silicio. E anche i transistor che controllano ciascun pixel possono essere realizzati con semiconduttori plastici.

Un'altra applicazione è la carta elettronica, in cui lo schermo, riflettente e non emittente, è costituito da minuscoli «bottoni» o microcapsule che possono commutare da uno stato nero a uno bianco. Versioni rigide della carta elettronica sono già usate come schermi programmabili. In febbraio, la Polymer Vision, una divisione della Royal Philips Electronics olandese, ha presentato un prototipo che combina l'e-paper sviluppata dalla E-Ink di Cambridge, nel Massachusetts, con un supporto flessibile, e sottile come la carta, contenente 80.000 transistor organici. Il risultato è uno schermo rettangolare con una diagonale di 12,5 centimetri, spesso appena tre volte più di un foglio di carta, che può essere arrotolato in un tubo di cinque centimetri di diametro. Una versione più piccola e con risoluzione inferiore può addirittura essere arrotolata con un raggio di un centimetro. I circuiti del dispositivo sono interamente in plastica, con l'eccezione di alcuni fili d'oro ultrasottili. Si tratta del primo schermo sottile prodotto su vasta scala: dalla linea di produzione della Polymer Vision ne escono 100 alla settimana.

L'elettronica plastica potrebbe presto fare il proprio ingresso anche nel mercato delle etichette di identificazione a radiofrequenza (RFID). Etichette di questo genere, basate su silicio e metalli, sono già in uso, per esempio, in alcuni sistemi di pagamento automatico del pedaggio, come il Telepass. Quando una macchina passa attraverso un casello dotato di RFID, un lettore manda un segnale radio che attiva il chip RFID presente nel tesserino collocato sul parabrezza dell'automobile. Il tesserino risponde inviando un codice che identifica l'automobile, e il pedaggio viene dedotto automaticamente dal corrispondente conto corrente. Al momento, il costo delle etichette RFID a base di silicio è di circa 20 centesimi di euro, sufficientemente basso per applicazioni come quella appena descritta, ma di gran lunga troppo alto per altri scopi, come l'etichettatura degli articoli di un supermercato. I chip RFID plastici potrebbero portare il costo fino a un centesimo, o anche meno, rendendoli concorrenziali rispetto ai codici a barre.

Possiamo immaginare tessuti elettronici con proprietà controllabili, come il colore per mimetizzarsi, o dotati di un monitor

LA CARTA ELETTRONICA PRODOTTA DALLA PHILIPS ha una risoluzione di 50 pixel per pollice (dpi) e può essere arrotolata in un cilindro di due centimetri di diametro. La carta sfrutta transistor a film sottile in pentacene prodotti a temperatura ambiente a partire da una soluzione liquida. I transistor operano abbastanza rapidamente da riprodurre filmati. Un e-book della Sony che usa una versione non flessibile della carta della Philips, con un substrato di vetro e una risoluzione di circa 170 pixel per pollice, è entrato in commercio quest'anno.

Memorie, nasi e pelle

Oltre ai LED per gli schermi e ai chip RFID, i circuiti organici hanno molte altre potenziali applicazioni. Per esempio nel dicembre 2003, all'annuale International Electron Devices Meeting (IEDM), ricercatori della Infineon hanno descritto due tipi di chip di memoria basati su polimeri organici. Il primo è una memoria non volatile, ossia in grado di conservare le informazioni anche quando viene spenta l'alimentazione. Secondo i ricercatori della Infineon i loro chip consentono di conservare i dati per oltre un anno, e il materiale impiegato potrebbe essere sfruttato per produrre strutture di dimensioni fino a 20 nanometri.

Il secondo chip è una memoria dinamica ad accesso casuale, o DRAM, in cui ogni bit di dati consiste in un transistor e un condensatore. In questo caso, le strutture più piccole hanno dimensioni fino a 140 nanometri. La DRAM è stata prodotta con una tecnica di rivestimento a centrifugazione modificata, usando un nuovo polimero che è stabile anche a temperature superiori a 450 gradi, molto più di quanto possa reggere la maggior parte dei polimeri conduttori.

Le plastiche conduttrici potrebbero tornare utili anche in dispositivi molto diversi, per esempio nei sensori chimici, che tradizionalmente consistono di una dozzina di elettrodi ricoperti con polimeri compositi mischiati, per esempio, con nerofumo. Ogni elettrodo ha un diverso tipo di polimero, e, quando questi composti sono esposti a uno specifico gas, ciascuno risponde a modo proprio, assorbendolo in misura maggiore o minore. Ciò determina un rigonfiamento del polimero e un'alterazione della sua conduttività, causata dalle particelle di carbonio. I diversi cambiamenti di conduttanza nelle decine di polimeri presenti fornisce un segnale univoco per ciascun gas.

Effetti analoghi possono essere ottenuti sfruttando polimeri conduttori e semiconduttori, invece dei compositi di nerofumo. I sensori a polimeri conduttori possono operare grazie al cambiamento diretto della resistenza elettrica del polimero, ma possono anche essere usati per produrre condensatori, o transistor a effetto di campo, le cui caratteristiche cambiano a seconda del tipo di gas che è stato assorbito. I sensori in plastiche conduttrici potrebbero anche rivelare una maggiore sensibilità rispetto a quelli tradizionali in materiali compositi: i transistor, in particolare, potrebbero funzionare come amplificatori incorporati della risposta del polimero.

Si può anche far dipendere la risposta di un componente al gas dalla particolare struttura del transistor o dal tipo di polimero usato. Nel 2001 Ananth Dodabalapur, ora all'Università del Texas ad Austin, ha dimostrato la fattibilità di simili sensori a transistor organici a film sottile, anche se per ora non sono disponibili sul mercato. Più di recente, Dodabalapur ha studiato sensori chimici nanoscopici, trovando che i sensori a transistor con canali intorno ai 10 nanometri rispondono in modo decisamente migliore rispetto a quelli più grandi.

Sensori del genere potrebbero essere incorporati nel tessuto di abiti per l'elettronica indossabile. Al Congresso IEDM del 2003, Vivek Subramanian, dell'Università della California a Berkeley, ha descritto come costruire i transistor direttamente sulle fibre (il suo gruppo di ricerca ha lavorato anche sui sensori chimici). I transistor erano in realtà costituiti da una miscela di materiali, fra cui fili di alluminio e contatti d'oro. I canali dei transistor, la sede della loro attività di commutazione, erano in pentacene flessibile, con una mobilità di 0,05 cm^2/Vs. I transistor erano formati a ogni intersezione delle fibre incrociate e il procedimento di fabbricazione era additivo: si procedeva cioè stendendo le fibre e depositandogli sopra altri strati. Eliminando il bisogno di incidere una qualsiasi struttura, come avviene nella litografia

UNA «PELLE» SENSIBILE ALLA PRESSIONE potrebbe donare ai robot il senso del tatto. Sviluppata da Takeo Someya all'Università di Tokyo, ogni suo sensore ha un'area di tre millimetri quadrati. Singole matrici di sensori possono essere unite per coprire aree più grandi semplicemente allineandone gli elettrodi e tenendole insieme con nastro adesivo. I transistor che controllano i sensori sono in pentacene.

PER APPROFONDIRE

DE LEEUW D., *Plastic Electronics*, in «Physics World», Vol. 12, n. 3, pp. 31-34, marzo 1999.

FRIEND R., BURROUGHES J. e SHIMODASOME T., *Polymer Diodes*, in «Physics World», Vol. 12, n. 6, pp. 35-40, giugno 1999.

GELINCK G. H. e altri, *Flexible Active-Matrix Displays and Shift Registers Based on Solution-Processed Organic Transistors*, in «Nature Materials», Vol. 3, n. 2, pp. 106-110, febbraio 2004.

SUNDAR V. C. e altri, *Elastomeric Transistor Stamps: Reversible Probing of Charge Transport in Organic Crystals*, in «Science», Vol. 303, pp. 1644-1646, 12 marzo 2004.

Le motivazioni per il premio Nobel per la chimica per l'anno 2000 sono consultabili al sito:
www.nobel.se/chemistry/laureates/2000/public.html

convenzionale, il processo può essere riscalato senza difficoltà fino a ottenere superfici anche di notevoli dimensioni.

Per quanto nelle porte dei transistor venisse usato come strato isolante un ossido non flessibile, il tessuto poteva essere piegato con una curvatura pari a quella di un cilindro di 15 centimetri senza peggiorare significativamente le prestazioni dei transistor. Sostituendo l'ossido con un isolante organico flessibile si dovrebbero poter raggiungere curvature ancora superiori.

Si possono immaginare vestiti confezionati con tessuti elettronici dalle proprietà controllabili, come il colore (per mimetizzarsi o dotare l'abito di uno schermo), la porosità (per regolare la traspirazione), o altre caratteristiche utili per modificare gli effetti di riscaldamento o raffreddamento. Questi «computer indossabili» potrebbero anche monitorare i segnali vitali di chi li porta o l'ambiente. La rete di fili permetterebbe di instradare i segnali attorno a eventuali strappi.

C'è ancora molto da lavorare per realizzare questi obiettivi. Per cominciare, i transistor hanno bisogno di durare più a lungo e di resistere alle flessioni del materiale. Le applicazioni descritte non richiedono, in compenso, transistor ad alte prestazioni. Nel 2001 la Defence Advanced Research Projects Agency statunitense lanciò un programma di sponsorizzazione e di coordinamento della ricerca nell'elettronica tessile.

Ma se i vestiti computerizzati non vi interessano, che ne pensate della pelle elettronica? Nel novembre 2003 Takao Someya e i suoi colleghi dell'Università di Tokyo hanno annunciato di aver sviluppato un foglio sensibile alla pressione a base di transistor in pentacene, da utilizzare per dare ai robot il senso del tatto. La parte sensibile della struttura è uno strato composito di gomma e carbonio, la cui resistenza elettrica varia a seconda della pressione applicata; in tal modo viene fatto commutare un transistor. Il gruppo ha prodotto unità con una griglia di 16 sensori per 16 (ciascuno con un'area di circa tre millimetri quadrati), insieme ai transistor che servono a estrarre il segnale.

Per coprire un'area più vasta, le unità possono essere connesse tra loro semplicemente sovrapponendo gli elettrodi ai loro bordi e applicando del nastro adesivo, ma non ci sono ragioni per cui non si possano produrre direttamente unità più grandi. L'intera struttura è costituita da polimeri e pentacene, con l'eccezione degli elettrodi d'oro e della copertura di rame che si trova vicino allo strato composito di carbonio e gomma. L'unità può essere piegata fino a un raggio di cinque millimetri, abbastanza per avvolgere le dita più sottili.

I robot non sono ancora diffusi al di fuori del campo industriale e di quello del divertimento (dove impera Aibo, il cane-robot della Sony). L'UNECE, United Nations Economic Commission for Europe, stima che entro la fine del 2002 nel mondo erano stati venduti soltanto 50.000 robot domestici (in gran parte falciatrici e aspirapolvere), ma prevede che il loro numero sia destinato a crescere di un fattore 10 o più da qui al 2006. Insieme ai robot, anche elettrodomestici intelligenti e prodotti pieni di schermi e sensori invaderanno sempre di più la nostra vita quotidiana. L'elettronica organica avrà un ruolo cruciale, a mano a mano che il futuro interattivo diventerà realtà.

LA TECNOLOGIA ELETTRONICA POTREBBE RENDERE LE

SICURI

ELEZIONI POLITICHE MOLTO PIÙ AFFIDABILI E ACCURATE

DEL PROPRIO

RISPETTO AL PASSATO, MA PER RAGGIUNGERE L'OBIETTIVO

VOTO

BISOGNA ANCORA SUPERARE ALCUNI OSTACOLI TECNICI

di Ted Selker

Votare sembra facile: si aprono le urne e si contano i voti. In realtà, le cose sono più complicate: i votanti devono essere registrati e i voti trascritti in segreto, trasferiti in modo sicuro e contati con cura. Poiché le elezioni sono un evento relativamente raro, la procedura non è una routine collaudata. Una singola elezione con due soli candidati è facile, ma una mezza dozzina di consultazioni con molti candidati sono una faccenda assai più complicata. Il processo di voto è così vitale per la democrazia che un suo malfunziomanento ha conseguenze altrettanto notevoli di un difetto tecnico in una centrale nucleare. I voti possono perdersi in ogni fase del procedimento. Le famigerate elezioni presidenziali del 2000 negli Stati Uniti hanno sottolineato alcuni errori fondamentali, ma sistematici, relativi a chi poté davvero votare e a come i voti furono contati. Secondo le stime, i voti non conteggiati o addirittura non espressi furono da quattro a sei milioni: più del due per cento dei 150 milioni di voti registrati.

LA MACCHINA DI VOTAZIONE AVC Edge della Sequoia Voting Systems è un esempio di macchina DRE (*Direct Record Electronic*) presente sul mercato statunitense. Gli elettori devono indicare la loro scelta utilizzando un *touch screen*.

Cortesia Sequoia voting systems

La cifra è spaventosamente alta, se si considera che alla fine la scelta di quale candidato dovesse assumere il più potente ruolo istituzionale del mondo è stata decisa da 537 schede elettorali dello Stato della Florida.

In sostanza, i problemi all'origine delle vicissitudini del 2000 furono tre. Il primo, e più importante, riguarda gli errori nelle liste elettorali che hanno impedito di votare a 1-3 milioni di elettori; l'esempio più eclatante sono gli 80.000 nomi assenti dalle liste elettorali della Florida a causa di un lacunoso algoritmo di calcolo. Un altro milione di voti, o forse due, non poterono essere conteggiati a causa di difetti del dispositivo, in gran parte dovuti a un'imprecisa progettazione della scheda elettorale. Ne è un esempio l'ormai famosa scheda con i lembi piegati della contea di Palm Beach, che ha confuso molti elettori portandoli involontariamente a votare per un candidato diverso da quello prescelto, il che ha contribuito a determinare un altro risultato che deve far pensare: 19.235 persone, il quattro per cento dei votanti, hanno scelto più di un candidato alla presidenza. I problemi con il dispositivo di conteggio – come l'erroneo allineamento dei nomi dei candidati ai buchi in cui andava indicata la preferenza – hanno dato come risultato altre 682 schede elettorali non contate. Infine, secondo lo U.S. Census Bureau, un milione di votanti registrati ha riferito di altri problemi nei seggi, per non parlare delle lunghe code che hanno impedito a molti di votare.

Così, nel complesso, i problemi di registrazione e le difficoltà nei seggi spiegano circa due terzi dei voti persi nel 2000 di cui si ha documentazione. Il rimanente terzo è dovuto a difetti tecnologici: in particolare al progetto della scheda elettorale e a guasti meccanici. Dopo le elezioni del 2000, i responsabili degli uffici elettorali di tutti gli Stati Uniti, a livello sia locale sia federale, si sono precipitati ad abbandonare i vecchi metodi, come le macchine per la punzonatura e le schede perforate, per passare a

metodi più moderni. Molti stanno adottando macchine di votazione elettroniche: ma sebbene queste macchine offrano vari vantaggi, bisogna essere sicuri che riescano effettivamente a semplificare il processo di elezione, riducendo gli errori ed eliminando le frodi.

Altri paesi hanno introdotto con successo i sistemi elettronici. Il Brasile ha cominciato a sperimentare le macchine per il voto elettronico a metà degli anni novanta, utilizzandole per il suo ampio bacino di 106 milioni di elettori a partire dal 2000. Per garantire la sicurezza, i diversi aspetti dello sviluppo delle macchine per il voto sono stati affidati a differenti organizzazioni. Inoltre, le macchine sono state introdotte a passi successivi, controllati con attenzione: 40.000 elettori nel 1996 (il sette per cento dei quali non riuscì a esprimere il proprio voto elettronicamente) e 150.000 nel 1998 (quando fallì il due per cento). I miglioramenti basati su questi esperimenti parziali hanno ridotto il tasso di errore stimato fino allo 0,2 per cento nelle elezioni del 2000.

La tecnologia del voto

I sistemi di voto hanno una lunga storia di progressi tecnologici. Nell'antichità – in Grecia, in Egitto e a Roma – le preferenze venivano segnate su cocci di ceramica, chiamati *ostraca*. La carta sostituì la ceramica con le schede elettorali da contare manualmente, che negli Stati Uniti sono ancora utilizzate dal 2,5 per cento degli elettori. Altre tecnologie moderne sono le macchine a leva e le schede perforate (il nome del candidato è vicino a uno spazio vuoto che può essere segnato per indicare la scelta e lo spoglio è effettuato in modo automatico da uno scanner). Nelle tabelle a pp. 92-93 sono indicati i pro e i contro di ciascuno di questi metodi, e qualche idea per migliorarli.

Le macchine per il voto elettronico esistono da 135 anni: Thomas Edison ne brevettò una nel 1869. Ma cominciarono a essere sperimentate solo negli anni settanta, quando divenne economicamente conveniente presentare e registrare una scheda elettorale direttamente su un file di computer. All'inizio, molte erano macchine ibride: la lista dei candidati era presentata sulla carta, ma i voti venivano assegnati pigiando dei tasti. Gli scrutatori dovevano allineare attentamente la carta con i tasti e gli indicatori luminosi. Macchine elettroniche che sfruttano questa sovrapposizione con la scheda di carta sono ancora sul mercato, ma le più moderne macchine DRE (*Direct Record Electronic*) presentano sia la scheda sia le informazioni di controllo su un unico display, che può essere combinato con l'audio.

Queste macchine hanno molti vantaggi: anzitutto, impediscono a un elettore di scegliere troppi candidati (evitando che la scheda sia nulla), e possono avvisare se nessun candidato è stato selezionato (scheda bianca). Per esempio, quando nel 2002 la Georgia ha adottato queste macchine le schede nulle passarono dal 3,2 per cento, una delle percentuali più alte degli Stati Uniti, allo 0,9. La cosiddetta «votazione senza scheda» permette alle macchine di eliminare la possibilità di alterazioni dolose durante lo spoglio e il conteggio (anche le macchine a leva, che risalgono al 1892, hanno molte di queste caratteristiche).

Eppure gli esordi della votazione DRE negli Stati Uniti non sono stati facili. L'industria delle macchine per votare è frammentata, i vari produttori seguono strade differenti e non esiste uno standard condiviso. Quale sia la macchina migliore è ancora materia di discussione tra le varie organizzazioni di cittadini e i gruppi, come l'IEEE Project 1583, sugli standard delle attrezzature per il voto elettronico. Non sono rari sospetti e insinuazioni su alcune società private, che ricorrerebbero alla corruzione per influenzare la sperimentazione e l'acquisto delle attrezzature.

A complicare la faccenda si aggiungono le giurisdizioni locali, che hanno differenti regole e metodi per valutare e utilizzare i dispositivi di votazione. Alcune contee, come quella di Los Angeles, commissionano macchine costruite in base alle proprie esigenze. Altre municipalità, viceversa, ne sanno così poco che si affidano a società private per lo svolgimento di tutte le operazioni di voto.

Le operazioni connesse alla costituzione dei seggi aumentano i pericoli legati alla sicurezza e ai potenziali malfunzionamenti. Ho visitato il deposito elettorale centrale (dove sono conservate le macchine e le registrazioni di voto) della contea di Broward, in Florida, mentre si stava per procedere al riconteggio dei voti nel dicembre del 2002. Nell'edificio, l'accesso per il carico e lo scarico delle merci era tenuto aperto per la ventilazione. Il centro di controllo per la registrazione dei voti era una stanzetta piena di computer: la porta non era chiusa a chiave e non veniva tenuta alcuna registrazione del personale che entrava e usciva.

Ma, oltre ai problemi esterni, le stesse macchine DRE hanno sofferto di problemi tecnici che ne hanno rallentato l'adozione. Gli elettori hanno trovato i display confusi o difficili da utilizzare, mentre altri problemi sono venuti da difetti del software e dalla messa a punto delle macchine DRE. Durante il riconteggio del 2002 nella contea di Broward, mi è stato permesso di fare qualche prova con alcune macchine della Electronic Systems and Services (ESS), uno dei maggiori produttori del paese in questo campo. Le macchine ESS producevano un eccesso di schede bianche, perché il bottone «vai alla prossima elezione» era troppo vicino al bottone «assegna il voto». Una delle schede audio, inoltre, era progettata così male che per votare ci volevano tre quarti d'ora.

Sulle macchine della Sequoia, un altro produttore, chi votava prima per il partito e poi cercava di selezionare il relativo candidato alla presidenza era ignaro del fatto che stava *de*selezionando la sua scelta per l'elezione presidenziale. In una contea del New Mexico dove si utilizzavano le macchine della Sequoia è stato registrato un buon 10 per cento di schede bianche.

L'esame delle nuove attrezzature per il voto elettronico rivela molti problemi meccanici in fatto di sicurezza. Per esempio, alcune macchine contengono un odometro elettronico che dovrebbe leggere ogni voto assegnato con il dispositivo. Ma l'odometro è connesso al resto della macchina con un cavo che uno scrutatore corrotto potrebbe staccare e deviare altrove senza rompere alcun sigillo.

Come la maggior parte del software, il codice sorgente delle macchine elettorali prodotte dalle varie società è coperto dal segreto commerciale. Le aziende che producono macchine elettroniche di votazione permettono agli acquirenti di mostrare, in via confidenziale, il codice sorgente a esperti di fiducia. Sfortunatamente, i responsabili degli uffici elettorali locali potrebbero non sapere dove trovare un esperto qualificato. E anche quando ne trovano uno, come garantire che le aziende tengano conto del suo parere? Nel 1997, per esempio, lo Stato dello Iowa prese in considerazione una macchina elettorale prodotta dalla Global Election Systems; in seguito, l'azienda fu acquistata dalla Diebold. Douglas W. Jones, esperto di informatica dell'Università dell'Iowa, sottolineò alcuni problemi di sicurezza e lo Stato preferì comprare le macchine prodotte da un'altra società, la Sequoia. Nel febbraio 2003 la Diebold lasciò il suo software su un server non sicuro e i critici delle apparecchiature DRE diffusero il codice su Internet. I problemi che Jones aveva segnalato sei anni fa non erano stati stati risolti. Chiunque possa accedere fisicamente alle macchine e abbia una moderata competenza informatica è in grado di violarle e di produrre qualunque risultato desideri.

La miglior sicurezza informatica disponibile dipende da sofisticati sistemi di crittazione e da protocolli accuratamente progettati. Ma per essere sicuri che un sistema non sia compromesso sono necessari dei test, e le macchine DRE non sono ancora oggetto dei test continuativi che sarebbero necessari. La sicurezza delle attuali macchine dipende interamente dagli scrutatori e dal tipo di procedure che seguono.

Poiché oggi, a prescindere dal metodo utilizzato, praticamente tutti i voti sono registrati e trasmessi in forma elettronica, la frode informatica è possibile in tutti i sistemi di votazione. L'avvento delle macchine DRE permetterebbe, in linea di principio, di sfuggire ai controlli a partire dal momento in cui l'elettore

IN SINTESI

- Dopo le famose elezioni presidenziali del 2000, in tutti gli Stati Uniti i responsabili elettorali hanno cercato di aggiornare le tecnologie di votazione con sistemi più moderni: le macchine elettroniche di voto a registrazione diretta (DRE).
- Quando uno Stato o una contea prendono in considerazione l'acquisto o l'adozione delle macchine DRE, dovrebbero affidarne la valutazione delle macchine a un team di esperti, in particolare per scongiurare la presenza di inconvenienti tecnici, software violati e falle nella sicurezza, e per valutare la qualità dell'interfaccia utente.
- I presidenti di seggio e gli scrutatori dovrebbero avere le competenze necessarie per garantire il funzionamento delle macchine e seguire procedure che garantiscano la sicurezza del voto.
- Oltre ai problemi connessi alla sicurezza, il processo di registrazione del voto e le procedure di costituzione dei seggi in generale devono essere migliorati per prevenire massicce perdite di voti.

LASCIARE UNA TRACCIA

Un *audit trail* – cioè una registrazione delle operazioni effettuate dalla macchina – su carta, su nastro o su CD permetterebbe un riconteggio indipendente dei voti espressi con la macchina elettronica di votazione.

LA VERSIONE AGGIORNATA della stampante VeriVote del sistema AVC Edge della Sequoia produce una copia cartacea del voto assegnato e la rende visibile dietro uno schermo. Prima di lasciare la cabina, l'elettore può controllare la documentazione cartacea, che viene conservata dalla macchina per un eventuale riconteggio.

Don Foley (*illustrazione*); cortesia Sequoia Voting Systems (*fotografia*)

LE TECNOLOGIE DI VOTAZIONE ATTUALI

Perfezionare una tecnologia già esistente può essere una scelta migliore dell'adozione affrettata di un sistema del tutto nuovo: una nuova tecnologia è spesso accompagnata da un più ampio margine di errore.

TECNOLOGIA	Scheda di carta, conteggio manuale	Macchine a leva	Schede perforate	Scheda cartacea a lettura automatica	Macchina elettronica	Votazione via Internet, SMS, TV interattiva
COMMENTI	• Utilizzata nell'1,3 per cento degli Stati Uniti	• Utilizzata per la prima volta nel 1892 a Lockport, nello Stato di New York	• Utilizzata per la prima volta nel 1964 nelle contee di Fulton e De Kalb, in Georgia	• Utilizzata per la prima volta nel 1962 in California	• Utilizzata per la prima volta nel 1976	• Votazione via Internet utilizzata per la prima volta nelle primarie del 2000 a Phoenix, Arizona
VANTAGGI	• Semplice • Minimo tasso di nulle e bianche	• Le schede nulle sono impossibili • Garanzia di segretezza del voto	• Registrazione a prova di errore umano • Macchine compatte	• La lettura ha un tasso di schede nulle e bianche più basso degli altri metodi meccanici • Più facile del metodo a scheda perforata • L'elettore può leggere nomi dei candidati	• Le schede nulle sono impossibili • Nessun errore umano di registrazione • Facile da usare per le persone disabili • Buona possibilità di controllo	• Si può votare da casa • Le persone con disabilità fisiche possono usare i loro dispositivi di ausilio • Non è possibile l'errore umano di registrazione
SVANTAGGI	• Lo scarto tra conteggio originario e riconteggio è spesso molto più alto che nei conteggi automatici • Continui sospetti di brogli o smarrimento	• Macchine ingombranti e pesanti • Odometri difettosi • Lettura errata degli odometri • Diminuzione di voti nelle elezioni meno importanti	• Difficoltà di votare in modo corretto • Fori spesso imperfetti • Problemi di grafica della scheda • Il lettore della scheda s'inceppa spesso • Scheda facile da scrutinare	• I lettori delle schede sono più lenti, più complessi dei lettori di schede perforate • Scheda di grandi dimensioni • Scheda facile da alterare	• Interfaccia utente spesso mediocre • Problemi di violazione del software • Problemi di obsolescenza del computer	• Problemi di violazione del software e della rete
POSSIBILI MIGLIORAMENTI	• Conteggio con scanner meccanici • Trattamento della carta con luce, calore o rivestimento per rendere il voto indelebile	• Messa a punto prima di ogni elezione • Odometri con videocamera • Migliorare l'etichettatura di gruppi di leve dedicate a un'elezione	• Metodi ottici per controllare la scheda in cabina	• Usare uno scanner nel seggio elettorale per verificare il voto prima che sia registrato • Dare all'elettore una seconda possibilità di voto • Utilizzare le DRE per segnare le schede	• Testare le schede • Considerare sistemi chiusi • Testare il sistema, anche nel giorno delle elezioni	• Utilizzare un browser speciale • Sistema su CD • Occorrono nuovi approcci alla sicurezza, per esempio agenti software multipli

Eliza Jewett

tenta di indicare la sua preferenza sulla scheda elettorale. La possibilità di manipolare le schede c'è sempre stata, ma un attacco informatico che colpisse una circoscrizione popolosa, dove siano in uso un solo tipo di software e un solo tipo di macchina, avrebbe ripercussioni di ampia portata. Quindi, se da un lato adottare un unico sistema permette alle grandi giurisdizioni di essere ben organizzate e di perfezionare i propri risultati, dall'altro è indispensabile sottoporre tutto il processo a un attento controllo.

La riuscita della riduzione delle schede nulle e bianche in Georgia, di cui abbiamo parlato, è un caso esemplare. Accurati test sulle DRE condotti presso la Kenisaw State University hanno evidenziato molti problemi, che sono stati risolti prima che le macchine fossero utilizzate. Queste rigorose verifiche, assieme a un'introduzione attenta dei nuovi metodi di voto, sono state fondamentali per il successo ottenuto in quello Stato.

Frodi elettroniche

Come si fa a scoprire tutti i pericoli creati da un cattivo software e a prevenirli o correggerli prima che compromettano un'elezione? La lettura del codice sorgente svela la sua qualità e il suo approccio ai problemi di sicurezza, e può rivelarne i difetti. Ma l'unico modo assolutamente affidabile per testare un software è farlo funzionare in tutte le situazioni che potrebbe trovarsi ad affrontare.

Nel 1984 Ken Thompson, ricevendo dall'Association for Computing Machinery il Turing Award (il riconoscimento più prestigioso nel campo della *computer science*), tenne un discorso dal titolo «Riflessioni per continuare ad avere fiducia». Nella sua presentazione illustrò pericoli come le cosiddette «uova di Pasqua» (*Easter egg*), pezzi di codice invisibili a un lettore del programma. In una macchina elettronica per il voto, questi frammenti di software non farebbero nulla fino al giorno delle elezioni, per poi cambiare la registrazione dei voti. Il codice potrebbe essere caricato in una macchina in molti modi: nel software di votazione stesso, negli strumenti che lo assemblano (compilatore, collegatore e *loader*), o in quelli da cui dipende il programma (database, *scheduler* del sistema operativo, gestione della memoria e dispositivo di controllo dell'interfaccia grafica utente).

Di conseguenza, bisogna effettuare test in grado di snidare «uova di Pasqua» e virus che entrerebbero in azione solo il giorno delle elezioni. Molte macchine per il voto elettronico hanno orologi interni che possono essere spostati sulla data delle elezioni per condurre il test. Tuttavia, anche questi orologi potrebbero essere manipolati dai responsabili degli uffici elettorali, per cui si dovrebbero costruire macchine in cui è impossibile regolare gli orologi a urne aperte, e che dovrebbero essere controllate per eventuali brogli nel giorno stesso delle votazioni. Nel novembre 2003, in California, è stata fatta una selezione casuale dei voti espressi con ciascun sistema di votazione nel giorno delle elezioni, e sono state effettuate accurate elezioni parallele per controllare l'affidabilità della registrazione dei voti effettuata dalle macchine. I test hanno confermato che le macchine funzionavano correttamente.

Preparare una tornata elettorale al riparo da tentativi di brogli significa compiere ogni sforzo per realizzare macchine elettroniche che non nascondano codici impropri. D'altra parte, la comunità dei ricercatori di computer science è perennemente alle prese con il problema della realizzazione di un software veramente sicuro. Gli esperti di sicurezza informatica sono già riusciti a escogitare diversi metodi per garantire l'affidabilità di sistemi informatici destinati ad altri scopi, per esempio le transazioni finanziarie. I software per la finanza trasferiscono ogni giorno miliardi di euro, sono ampiamente testati e resistono bene agli attacchi: le stesse tecniche di sicurezza possono essere applicate alle macchine per il voto. Alcuni ricercatori ritengono che le precauzioni di sicurezza del software *open source* (che rendono i programmi disponibili all'esame di chiunque) e le tecniche di crittazione possano contribuire, ma non completamente, a difendere le votazioni dagli attacchi informatici.

La protezione dei risultati elettorali dalle irregolarità ha sempre coinvolto più soggetti umani che si controllano a vicenda per evitare errori o tentativi di frode. I migliori progetti futuri potrebbero includere agenti virtuali che si controllano gli uni con gli altri, creando revisori interni per convalidare ogni passaggio del processo di votazione. SAVE (*Secure Architecture for Voting Electronically*), del Massachusetts Institute of Technology, è un progetto di ricerca dimostrativo per sperimentare questo approccio. SAVE funziona mediante diversi programmi che portano avanti lo stesso compito, ma utilizzando metodi così differenti che per riuscire a compromettere il risultato finale ciascun programma dovrebbe essere violato singolarmente. E il sistema è in grado di lanciare l'allarme quando troppi moduli sono in disaccordo.

Prove di registrazione

Alcuni critici insistono sul fatto che il miglior modo per evitare questi attacchi è fornire una scheda elettorale separata su supporto cartaceo. Questo schema, che è stato ampiamente pubblicizzato, è il VVPB (*Voter-Verified Paper Ballot*), suggerito da Rebecca Mercuri quando lavorava al Bryn Mawr College, in Pennsylvania. La macchina stampa una ricevuta, e l'elettore può assicurarsi che almeno sulla carta siano registrate le sue reali intenzioni di voto. Questa ricevuta rimane dietro uno schermo trasparente in modo che nessuno possa impossessarsene durante la lettura, e viene trattenuta dalla macchina. Se sorge un contenzioso sul conteggio elettronico, può essere condotto un nuovo spoglio utilizzando le ricevute stampate. (Pensare che la copia sia conservata dall'elettore non è una buona idea perché incoraggerebbe la compravendita di voti.)

Di primo acchito, il VVPB sembra piuttosto vantaggioso; purtroppo, un'analisi più attenta evidenzia gravi inconvenienti. In primo luogo, il metodo è complicato per l'elettore. Negli Stati Uniti spesso si svolgono contemporaneamente consultazioni per più cariche elettive; convalidare tutte le scelte su un foglio separato dopo che la scheda è stata compilata non è un compito semplice. L'esperienza dimostra inoltre che anche di fronte alla prova scritta che indica agli elettori di aver commesso un errore, pochi hanno voglia di tornare indietro a correggerlo. Qualunque cosa distolga l'attenzione dall'atto immediato di compilazione della scheda riduce le possibilità di una persona di votare in modo corretto: ogni ulteriore compito o decisione è una fonte di errore e di perdita di voti.

Lo schema è complicato anche per il responsabile del seggio. Se un elettore denuncia un potenziale imbroglio come ci si deve comportare? L'elettore dichiara di aver votato per il candidato A, ma sia lo schermo del DRE sia la ricevuta mostrano un voto per il candidato B. In tal caso bisognerebbe chiudere il seggio elettorale? Inoltre, gli scrutatori non hanno il potere legale di vedere la scheda di un singolo elettore.

Il VVPB risolve solo una parte del problema dei brogli. Un pirata informatico che viola il software di stampa può tranquillamente inserire anche i documenti cartacei in un piano di contraffazione elettorale. E, dopo le elezioni, la carta è manipolabile in tutti i soliti modi.

Un'opzione migliore sarebbe quella di consentire la verifica della scelta elettorale con un messaggio audio registrato. Una registrazione su nastro magnetico o CD è più difficile da manomettere di una raccolta di ricevute cartacee. La maggior parte delle attuali macchine per il voto può essere regolata in modo che un sintetizzatore vocale ripeta all'elettore la sua scelta mentre guarda l'interfaccia visiva. Il nastro può essere letto da un computer o ascoltato da una persona. Poiché la lettura errata di documenti cartacei rappresenta un problema serio per tutte le macchine di conteggio attuali, il nastro può essere verificato meglio delle ricevute su carta. Una ricevuta audio, inoltre, è preferibile a una su carta anche perché è più difficile cambiare o cancellare le registrazioni audio senza lasciare traccia (si pensi ai famosi 18 minuti mancanti nelle registrazioni del caso Watergate). Inoltre, nastri e CD sono più facili da conservare di migliaia di ricevute scritte.

Altre proposte per la verifica da parte degli elettori comprendono la registrazione dell'immagine video del DRE e la presentazione della scheda elettorale così come è stata ricevuta dai database di conteggio centrali mentre l'elettore è nella cabina. Il vantaggio di queste tecniche è che sono passive, non richiedono cioè ulteriori azioni da parte dell'elettore.

Ecco come potrebbe svolgersi la votazione con un sistema di registrazione audio ben progettato. Immaginate di stare votando su un computer. Il vostro candidato è Abby Roosevelt, indipendente. Premete un tasto sullo schermo per fare la vostra scelta. Il nome viene evidenziato, e lo schermo mostra che la scelta è stata effettuata. A quel punto, gli auricolari che state indossando vi dicono che avete votato per Ben Jefferson (e queste parole sono registrate su un nastro di backup). «Ben Jefferson?» Vi rendete conto che dovete aver premuto involontariamente il tasto sbagliato. Cercate un bottone per cancellare il voto. «Voto per Ben Jefferson cancellato», dice il nastro. Il computer ritorna alla schermata iniziale, voi sceglierete il tasto da premere con maggiore attenzione di prima e siete ricompensati con un «Hai votato per Abby Roosevelt, indipendente.» E passate alla scheda per la consultazione successiva.

Le procedure appena descritte sono progettate per fornire il sistema di controllo più facile da comprendere. Le persone riescono a prestare maggiore attenzione a etichette in movimento, a finestre che compaiono e scompaiono e a variazioni di grafica e di contrasto luminoso. Senza questo tipo di controllo, vi sarebbero problemi a procedere senza errori. Anche la verifica audio è vantaggiosa, dal momento che può essere data nell'istante stesso in cui l'elettore sta agendo. I compiti percettivi (vedere i movimenti e sentire l'audio) sono più facili di quelli cognitivi (leggere una ricevuta cartacea e ricordare tutti i candidati che si volevano votare). Una registrazione su nastro o un CD è permanente e indipendente dalla trascrizione del voto.

Queste caratteristiche possono essere adottate per migliorare la scheda elettorale sulle macchine attuali. Naturalmente, occorrerebbe un ulteriore lavoro per permettere anche alle persone con problemi di vista o di udito di verificare le registrazioni multiple della loro scheda elettorale.

Alcuni ricercatori stanno studiando alternative alle DRE, sotto forma di votazioni via Internet o di strumenti familiari come il telefono. Nel maggio 2002, in Gran Bretagna è iniziata la sperimentazione di vari sistemi per incrementare l'affluenza alle urne, sistemi che comprendono l'invio postale di schede che possono essere scrutinate da un lettore automatico utilizzando una chiamata telefonica standard e la tastiera del telefono, gli SMS dei cellulari o addirittura la TV interattiva che viene diffusa nelle case inglesi. La circoscrizione di Swindon, per esempio, ha coinvolto più di 100.000 elettori in un esperimento che utilizzava Internet e la rete telefonica. Al domicilio dei partecipanti era recapitato un codice PIN a 10 cifre, che veniva poi utilizzato con una password, inviata separatamente, per l'autorizzazione al voto. Nessun broglio è stato rilevato, ma il progetto ha aumentato l'affluenza alle urne solo di tre punti percentuali.

Per contro, introducendo l'opzione del voto postale l'affluenza degli elettori è aumentata di 15 punti percentuali, ma con un inconveniente: nelle zone di Manchester e Bradford è stata rilevata una diffusa compravendita di voti. (Essere in grado di dimostrare a chi si è dato il voto, mostrando la scheda elettorale che si sta spedendo, incoraggia il fenomeno).

Prima o poi tutti i voti sono registrati in forma elettronica: **la frode informatica è possibile** con tutti i sistemi di votazione

Cortesia Diebold Election Systems

Che cosa bisogna fare

L'adozione universale di macchine per il voto perfette non avverrà tanto presto. Ma, a prescindere dalle macchine usate, negli Stati Uniti molto può e deve essere fatto per garantire che i voti siano raccolti e conteggiati con cura. I miglioramenti da adottare senza ritardi sono questi:

1. Bisogna semplificare il sistema di registrazione. L'ampia perdita di voti del 2000 è avvenuta perché gli errori di registrazione nelle liste elettorali hanno impedito a molte persone di votare. I database delle registrazioni devono essere controllati attentamente per essere sicuri che includano tutti coloro che hanno il diritto di essere registrati. Occorre sviluppare standard e tecnologie nazionali per assicurare che gli elettori possano registrarsi in modo affidabile, ma che non si registrino – e quindi votino – in più di un seggio.

2. I responsabili dei seggi elettorali devono conoscere il funzionamento della macchina che è stata loro affidata e devono testarne accuratamente le prestazioni quando viene consegnata, e di nuovo prima di ogni consultazione elettorale. Le DRE dovrebbero essere messe alla prova nel giorno delle elezioni, utilizzando circoscrizioni fittizie.

3. I responsabili degli uffici elettorali locali devono istruire gli scrutatori utilizzando semplici procedure per far funzionare la macchina per il voto. La realizzazione, la compilazione e la raccolta delle schede devono essere regolate in modo da evitare qualsiasi errore o broglio. Molti responsabili di seggio utilizzano involontariamente procedure che compromettono l'accuratezza, la sicurezza e l'integrità delle schede elettorali, per esempio spegnendo gli scanner che verificano la presenza delle schede nulle, e ispezionando ed effettuando «correzioni» sulle schede elettorali.

4. Ciascun passaggio del processo di votazione deve essere al riparo da intrusioni indebite. La raccolta, lo spoglio, il conteggio e la conservazione delle schede elettorali devono essere effettuati tenendo una documentazione di chi ha toccato che cosa, e affiancati da chiare procedure su ciò che deve essere fatto con i vari materiali in ogni momento del processo. Inoltre, tutti i passaggi più critici devono avvenire alla presenza, e con la supervisione, di più persone.

NEI TRIBUNALI E SUI GIORNALI

Negli ultimi mesi, le macchine elettroniche per il voto sono finite spesso sulle pagine dei giornali americani, in seguito alle azioni legali collettive pro e contro di esse e dei nuovi problemi emersi nel corso delle consultazioni elettorali.

Marzo — In una causa intentata dall'American Association of Disabled Persons, un giudice federale della Florida ha ordinato alla contea di Duval di adottare almeno una macchina che permetta alle persone ipovedenti di votare senza assistenza nel 20 per cento dei seggi. La contea di Duval si è appellata, e in aprile il giudice ha ribadito la sua decisione.

Aprile — Nel Maryland, gli attivisti della Campaign for Verifiable Voting hanno presentato istanza contro il Maryland Board of Elections per impedire l'uso delle 16.000 macchine DRE dello Stato che non possiedono stampanti per produrre ricevute cartacee come richiesto dalla legge statale. La causa è dovuta al fatto che durante le elezioni primarie del 2 marzo le schede cartacee sono state consegnate ad alcuni elettori che ne avevano fatto richiesta, ma successivamente invalidate.

Aprile — In seguito ai problemi emersi nelle elezioni primarie del 2 marzo, il segretario di Stato della California ha vietato l'uso, per le elezioni del novembre 2004, di più di 14.000 macchine DRE prodotte dalla società Diebold. Egli ha inoltre revocato la certificazione di altre 28.000 DRE fino all'avvenuto aggiornamento della loro sicurezza. (Alcune società hanno poi riottenuto l'omologazione.) Tre contee hanno fatto causa per bloccare la decisione, mentre un gruppo di elettori disabili ha presentato una petizione per renderla inapplicabile. Inoltre, il segretario di Stato della California ha chiesto al procuratore generale di verificare l'esistenza di possibili reati penali e civili a carico della Diebold, a causa di ciò che egli definisce «azioni fraudolente». Un rapporto accusa infatti la società di aver infranto le leggi elettorali della California installando software non certificato nelle macchine DRE di quattro contee e di aver mentito in proposito.

Maggio — In Florida, il deputato Robert Wexler ha intentato causa per impedire l'uso delle macchine della Election Systems and Services delle contee di Broward e Miami-Dade.

Giugno — La League of Women Voters, che nel 2003 approvava la votazione elettronica senza carta, ha cambiato idea, e ha adottato una risoluzione per favorire i sistemi «sicuri, accurati, accessibili e che garantiscono un facile riconteggio», come quelli con ricevuta stampata. L'Election Assistance Commission ha chiesto misure di sicurezza più rigide per la votazione elettronica alle elezioni presidenziali di novembre.

Luglio — In Florida, alcune associazioni di cittadini hanno chiesto al giudice di Tallahassee di intervenire prima delle elezioni primarie del 31 agosto annullando la decisione del governatore Jeb Bush di non permettere il riconteggio manuale dei voti nelle 15 contee che adottano le macchine per il voto dotate di *touch-screen*. Anche in Florida, le registrazioni di controllo delle consultazioni del 2002 hanno evidenziato una perdita di voti dovuta a difetti delle macchine.

Settembre — Il Nevada, in un'elezione primaria, è il primo Stato a utilizzare DRE che stampano una ricevuta cartacea.

L'AUTORE

TED SELKER è docente del Massachusetts Institute of Technology e condirettore del California Institute of Technology/MIT Voting Project, che valuta l'impatto della tecnologia sul processo elettorale. Gran parte della sua ricerca riguarda l'invenzione e la sperimentazione di nuove tecnologie, tra cui i nuovi approcci alle interfacce utente e al disegno della scheda elettorale, le architetture elettroniche sicure e i modi di migliorare la registrazione. Prima di arrivare al MIT nel 1999, Selker era dipendente IBM e dirigeva lo User Systems Ergonomics Research Laboratory.

PER APPROFONDIRE

AGRESTI ALAN e PRESNELL BRET, *Misvotes, Undervotes and Overvotes: The 2000 Presidential Election Florida*, in «Statistical Science», Vol. 17, n. 4, pp. 436-440, 2002. Disponibile sul sito: web.stat.ufl.edu/~presnell/Tech-Reps/election2000.pdf

MERCURI REBECCA, *A Better Ballot Box?*, in «IEEE Spectrum», Vol. 39, n. 10, pp. 46-50, ottobre 2002. Disponibile sul sito: www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/oct02/evot.html

Il Voting Technology Project del Caltech/MIT è disponibile sul sito: www.vote.caltech.edu

5. Ogni passaggio delle operazioni di voto deve essere chiaro e accessibile, avere un meccanismo di aiuto e consentire all'elettore di convalidare la propria scelta. Occorre tenere conto delle capacità percettive, cognitive e motorie delle persone sia quando si progettano le macchine sia quando si progettano le schede elettorali. Prima di essere sottoposta all'approvazione dei partiti che partecipano alla consultazione, la scheda elettorale dovrebbe superare test di facilità d'uso e di conteggio. Gli elettori devono essere in grado di comprendere in quale modo possono esprimere le proprie scelte, e queste devono essere semplici da conteggiare anche quando sono in grandi quantità.

6. Bisogna investire in ricerca per lo sviluppo e la sperimentazione delle tecnologie di voto, incluse le macchine DRE e la votazione via Internet. Sul lungo periodo, affrettare l'adozione di nuove macchine non è il miglior modo di utilizzare i fondi disponibili.

7. Bisogna fissare, e far rispettare, standard etici in merito agli investimenti e alle donazioni che riguardano sia gli ufficiali elettorali sia le aziende che si occupano di gestire le votazioni.

Solo quando questi requisiti saranno soddisfatti avremo un sistema di voto veramente sicuro e affidabile, qualunque sia la tecnologia utilizzata.

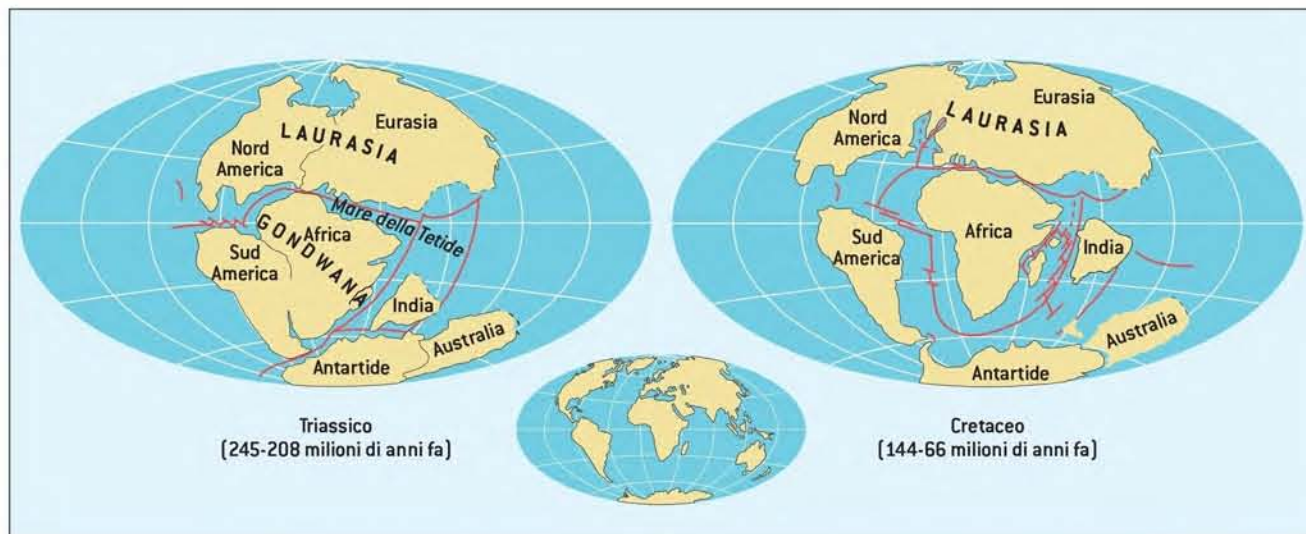
La nascita dei supercontinenti

Nella storia passata della Terra sono esistiti almeno sei supercontinenti, e altri forse torneranno a formarsi in futuro. Ecco come potrebbe avvenire la loro aggregazione

di J. Brendan Murphy e R. Damian Nance

Come salutare esercizio di umiltà, dovremmo sempre tener presente che non possiamo dare per scontata nemmeno la stabilità del terreno che abbiamo sotto i piedi. I dati geologici dimostrano infatti con ragionevole sicurezza che, tra 200 e 300 milioni di anni fa, tutte le masse continentali del globo erano riunite in un unico supercontinente, il Pangea (ossia «tutte le terre»), circondato da un superoceano noto come Pantalassa («tutti i mari»).

NASA/JPL/NIMA

LA FRAMMENTAZIONE E LA DISPERSIONE del supercontinente Pangea, avvenute negli ultimi 200 milioni di anni, hanno portato alla creazione e all'espansione dell'Oceano Atlantico e alla distruzione di una quantità equivalente di litosfera nel Pacifico e nel Mare della Tetide.

In realtà, gli ultimi 200 milioni di anni di evoluzione della Terra sono stati dominati dalla frattura del supercontinente Pangea e dalla formazione di nuovi oceani, come l'Atlantico, tra i frammenti continentali alla deriva. E da un paio di decenni si vanno accumulando le prove che Pangea sia stato solo l'ultimo di una serie di supercontinenti che si sono aggregati e dispersi nel corso di tre miliardi di anni. I meccanismi responsabili di questi ripetuti cicli di formazione e frattura sono ancora in discussione, ma la maggioranza dei geologi ritiene che abbiano avuto un effetto profondo sull'evoluzione della crosta terrestre, dell'atmosfera, del clima e della vita per miliardi di anni. L'aggregazione del Pangea sembra essere stata preceduta da quella di Pannotia, da circa 650 a 550 milioni di anni fa e, per quanto la sua configurazione sia dibattuta, vi è un consenso generale sull'esistenza del supercontinente Rodinia, circa un miliardo di anni fa. Un altro supercontinente, denominato ora Nuna ora Columbia, si pensa possa essersi formato circa 1,8 miliardi di anni fa. Altri due, Kenorland e Ur, dovrebbero essersi aggregati rispettivamente 2,5 e 3,0 miliardi di anni fa.

C'è quindi una forte probabilità che un altro supercontinente si possa formare in futuro. Ma in che modo potrebbe nascere, e quale aspetto avrebbe? I modelli contrapposti sono due: il primo prevede che i continenti si allontanino e si riavvicinino con un movimento a fisarmonica; l'altro ipotizza che i continenti si frammentino e compiano un lungo tragitto attorno alla Terra per andare a riunirsi sul lato opposto. Per stabilire quale dei due modelli sia corretto dobbiamo prima passare brevemente in rassegna i principi di base della tettonica a placche, la teoria che ha rivoluzionato la nostra comprensione del pianeta fornendo una spiegazione esauriente delle forze che lo plasmano.

Continenti on the road

Secondo la teoria della tettonica a placche, la Terra ha uno strato esterno rigido, la litosfera, di spessore generalmente compreso tra 100 e 150 chilometri, che poggia al di sopra di uno strato caldo e plastico del mantello terrestre, l'astenosfera. Come un guscio d'uovo incrinato, la litosfera è frammentata in un mosaico di circa 20 «lastroni», detti placche o zolle, che si spostano l'uno rispetto all'altro con una velocità inferiore a 10 centimetri all'anno.

Le placche interagiscono lungo i loro confini, dove possono convergere ed entrare in collisione, oppure divergere, e quindi separarsi, o ancora scivolare l'una di fianco all'altra. Nel corso di milioni di anni, tali interazioni hanno fatto sì che le montagne si sollevassero in corrispondenza delle collisioni, oppure che i continenti si separassero in corrispondenza delle divergenze.

I continenti sono incorporati nelle placche, e vanno alla deriva con esse. Nell'arco di milioni di anni, questo movimento è sufficiente ad aprire e chiudere interi oceani. Il confine lungo il quale i continenti divergono assume la forma di una dorsale medio-oceanica che decorre per tutta la lunghezza del bacino. Dalla cresta di questa dorsale, nuovo fondo oceanico si espande in entrambe le direzioni via via che un magma caldissimo risale dal mantello sottostante per poi raffreddarsi e solidificarsi, generando nuova litosfera tra le placche divergenti.

Dato che la Terra ha un raggio costante, la creazione della litosfera deve essere necessariamente compensata dalla distruzione di altra litosfera. Per esempio, mentre l'Oceano Atlantico andava aprendosi, la convergenza dell'Africa con l'Europa e dell'India con l'Asia chiudeva l'antico Mare della Tetide e il movimento verso ovest delle Americhe consumava buona parte del Pacifico.

IN SINTESI

- Negli ultimi vent'anni i geologi che si occupano di processi geodinamici hanno trovato numerose prove che dimostrano come il supercontinente Pangea sia stato solo l'ultimo di una serie di supercontinenti che si è succeduta per tre miliardi di anni.
- Le sofisticate tecniche di datazione delle rocce messe recentemente a punto hanno consentito di stabilire che l'attività di aggregazione e disaggregazione dei supercontinenti non è continua, ma segue un ciclo di circa 500 anni.
- Per spiegare la formazione dei supercontinenti sono stati proposti due modelli: il primo prevede l'esistenza di un oceano interno che, chiudendosi, origina un supercontinente per introversione (così si è formato Pangea 300 milioni di anni fa); l'altro prevede la chiusura di un oceano esterno e la formazione di un nuovo supercontinente per estroversione (è quanto si è verificato con Pannotia 600 milioni di anni fa).

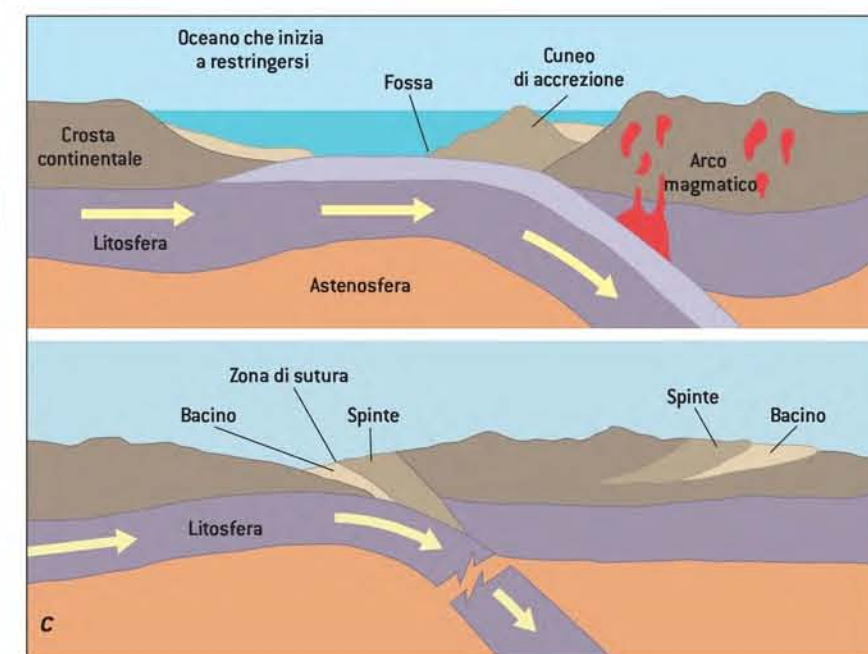
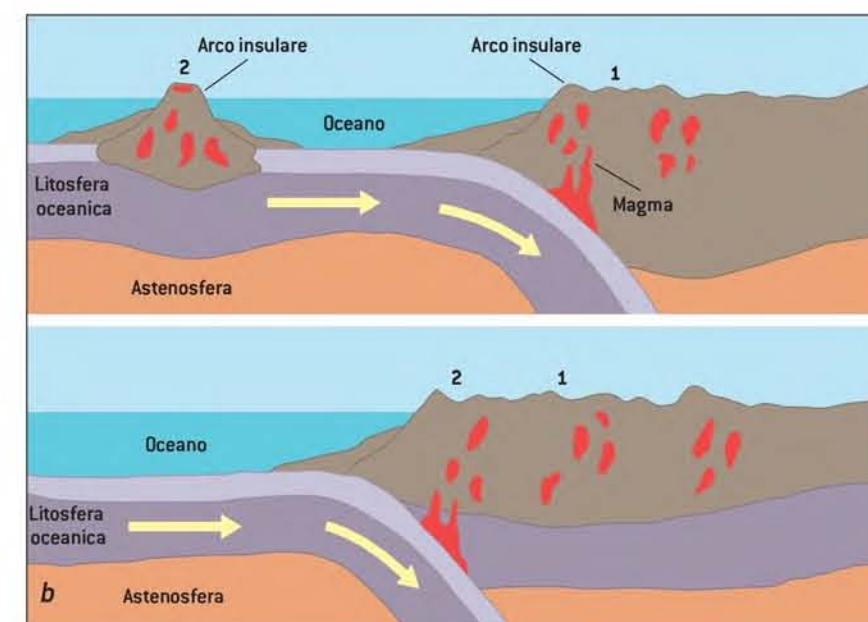
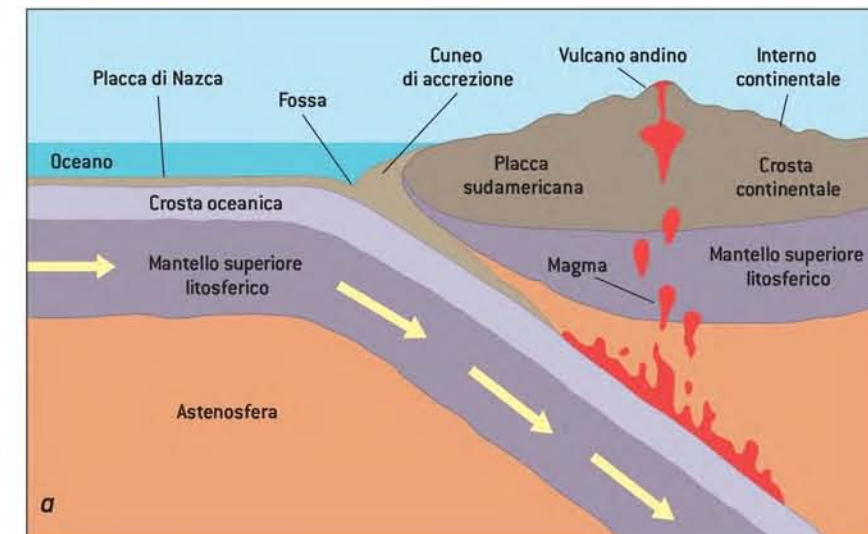
SONO ALMENO SEI I SUPERCONTINENTI che si sono aggregati nel corso della storia della Terra (*tabella in basso*). La formazione delle montagne (orogenesi) offre importanti indizi sui movimenti dei continenti. Vi sono tre tipi fondamentali di orogenesi. La subduzione porta allo sviluppo di montagne formate dalla risalita di magma (*a*). Le Ande ne sono un esempio moderno. Oppure la subduzione trasporta crosta oceanica e frammenti di placche verso i margini continentali, dove subiscono accrezione (*b*). Il margine occidentale del Nord America ha conosciuto diversi di questi episodi negli ultimi 200 milioni di anni, che hanno comportato l'accrescimento verso ovest del continente e la formazione di catene montuose. Infine, la collisione tra continenti avviene quando l'oceano interposto è consumato (*c*). Le Alpi e l'Himalaya si sono formati così.

I tempi dei supercontinenti

Evento	Anni fa
Frammentazione di Pangea	~ 200 milioni
Aggregazione di Pangea	~ 300–250 milioni
Frammentazione di Pannotia	~ 550 milioni
Aggregazione di Pannotia	~ 600 milioni
Frammentazione di Rodinia	~ 760 milioni
Aggregazione di Rodinia	~ 1,1 miliardi
Aggregazione di Nuna/Columbia	~ 1,8 miliardi
Aggregazione di Kenorland	~ 2,5 miliardi
Aggregazione di Ur	~ 3,0 miliardi

GLI AUTORI

J. BRENDAN MURPHY, dopo gli studi all'Università di Dublino, si è trasferito in Canada dove nel 1982 ha conseguito il Ph.D. in scienze geologiche alla McGill University. Oggi insegna al Dipartimento di scienze della Terra della St. Francis Xavier University. R. DAMIAN NANCE si è laureato in geologia all'Università di Leicester. Dopo il Ph.D. in geologia a Cambridge, nel 1980 si è trasferito all'Università dell'Ohio, dove è professore di scienze geologiche.
Questo articolo è stato originariamente pubblicato su «American Scientist».

NASA/STS108-711-25

LE FORZE CHE MODELLANO LA TERRA sono ancora in piena attività. L'immagine da satellite a destra mostra la collisione tra le placche dell'Africa orientale e dell'Arabia. A sinistra, le catene montuose dell'Atlante e dell'Anti Atlante, in Marocco, formatesi in seguito alla collisione tra placca africana e placca eurasiatica.

Jacques Descloitres, MODIS Land Rapid Response Team/NASA/GSFC

collisione comporta deformazione di rocce e attività ignea, che insieme concorrono a formare le montagne. È questo il caso delle catene montuose della costa occidentale del Nord America. Questo margine continentale ha sofferto ripetute collisioni con molte isole del Pacifico nel corso degli ultimi 200 milioni di anni, producendo un'accrezione verso ovest della placca nordamericana di circa 500 chilometri, dalla Baja California, a sud, fino all'Alaska, a nord. Collettivamente, i processi di subduzione e di collisione di terranes danno luogo ai cosiddetti orogeni periferici, così chiamati poiché si formano lungo la periferia dei continenti.

Se la placca che va in subduzione porta con sé crosta continentale, una collisione tra continenti è inevitabile. In questo scenario, un intero oceano viene consumato, e imponenti montagne si sollevano in corrispondenza della collisione frontale tra un continente e l'altro. Ne sono un esempio la collisione dell'India con l'Asia

I continenti **si muovono in continuazione** l'uno rispetto all'altro **unendosi e separandosi** periodicamente

Quando i continenti convergono, la litosfera oceanica coinvolta rientra nel mantello e viene consumata in un processo noto come subduzione. In generale, la crosta oceanica è più densa della crosta continentale e, laddove quest'ultima incontra crosta oceanica in corrispondenza di un margine di placca convergente, la litosfera oceanica va di preferenza in subduzione immergendosi al di sotto della placca continentale. Il fatto che la grande maggioranza della litosfera oceanica non sia più vecchia di 180 milioni di anni, a fronte di una litosfera sormontata da crosta continentale che raggiunge i quattro miliardi di anni di età, attesta che è la crosta oceanica a venire distrutta, di preferenza. Perché un oceano come Tetide si sia potuto chiudere, deve essere consumata più litosfera per subduzione di quanta non ne sia stata creata in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche.

Secondo la teoria della tettonica a placche, il processo di subduzione può essere direttamente o indirettamente responsabile dell'orogenesi, la formazione delle montagne. Per prima cosa, lo stesso processo di subduzione genera montagne. Il riscaldamento della placca oceanica fredda e densa durante la sua discesa nell'interno della Terra innesca un'ampia schiera di processi al di sopra della zona di subduzione, compresa la generazione di magma fuso che tende a risalire in superficie. Questo magma va ad alimentare i vulcani e rigonfia la crosta così da creare rilievi montuosi. Le Ande sono un moderno esempio di montagne formate da processi di questo tipo, e molti dei più alti rilievi di questa catena sono vulcanicamente attivi. O quantomeno lo sono stati, in un passato recente.

La collisione di un continente con piccoli blocchi continentali o isole oceaniche (collettivamente indicati con il termine *terranes*) è un'altra forma di processo orogenetico. Tutti gli attuali oceani contengono isole, come gli arcipelaghi del Giappone o delle Hawaii, e, se la litosfera oceanica che separa queste isole dal margine di un continente viene consumata per subduzione, le isole si troveranno a essere lentamente spinte verso il continente fino a entrare in collisione con esso. Questa meridionale, che ha formato l'Himalaya, e quella tra Africa settentrionale ed Europa meridionale, che ha formato le Alpi. Entrambe sono state il risultato della consunzione della Tetide, concomitante all'apertura dell'Oceano Atlantico.

Il ciclo del supercontinente

Con il perfezionamento delle tecniche di datazione delle rocce, i geologi si sono resi conto che l'attività orogenetica non è distribuita uniformemente nel tempo. Si riscontrano invece intervalli relativamente brevi, di circa 100-200 milioni di anni, durante i quali si è verificato un numero significativo di collisioni continentali, e altri intervalli più lunghi (fino a 300 milioni di anni) durante i quali tale attività è stata minima. Questa scoperta ha condotto a un'ipotesi nota come «ciclo del supercontinente», secondo la quale l'aggregazione temporanea di tutti i continenti in una singola massa, o supercontinente, si verifica approssimativamente ogni 500 milioni di anni.

Quali sono i segni caratteristici delle fasi di questo ciclo? I periodi di frammentazione e dispersione sono documentati per prima cosa dell'iniezione di magma basaltico nelle fratture sviluppate dalla lacerazione, a formare sistemi di dicchi basaltici (corpi di magma, simili a fogli, che tagliano trasversalmente le stratificazioni di rocce adiacenti); poi, mentre la deriva dei continenti è in corso, dallo sviluppo di margini continentali, come quelli del moderno Atlantico, e di nuova litosfera oceanica in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche. La maggior parte dei geologi ritiene che un supercontinente si frammenti e si disperda perché funziona come un isolante che intrappola il calore del mantello. Di conseguenza, il mantello si riscalda, generando magma basaltico che risale fino alla superficie.

La convergenza continentale, che in definitiva conduce a una nuova aggregazione supercontinentale, è rappresentata sequenzialmente dall'esordio della subduzione e dalla distruzione della crosta oceanica interposta, dall'aggregazione di terranes ai margini continentali, tramite un processo di accrezione, e, infine, dalle collisioni tra continenti. Le forze che danno inizio alla subduzione sono oggetto di acceso dibattito, per quanto la maggior parte degli scienziati concordi sul fatto che le placche oceaniche invecchino, si raffreddino e divengano così progressivamente più dense, finendo con l'immergersi nel mantello. Via via che la placca oceanica discende, la forza di gravità ne trascina il resto dietro di essa, proprio come una tovaglia che da sola scivola dal tavolo quando pende troppo da una parte. Di conseguenza, i continenti incorporati in placche che vanno in subduzione sono trascinati verso le zone di subduzione, e qui finiscono con l'entrare in collisione.

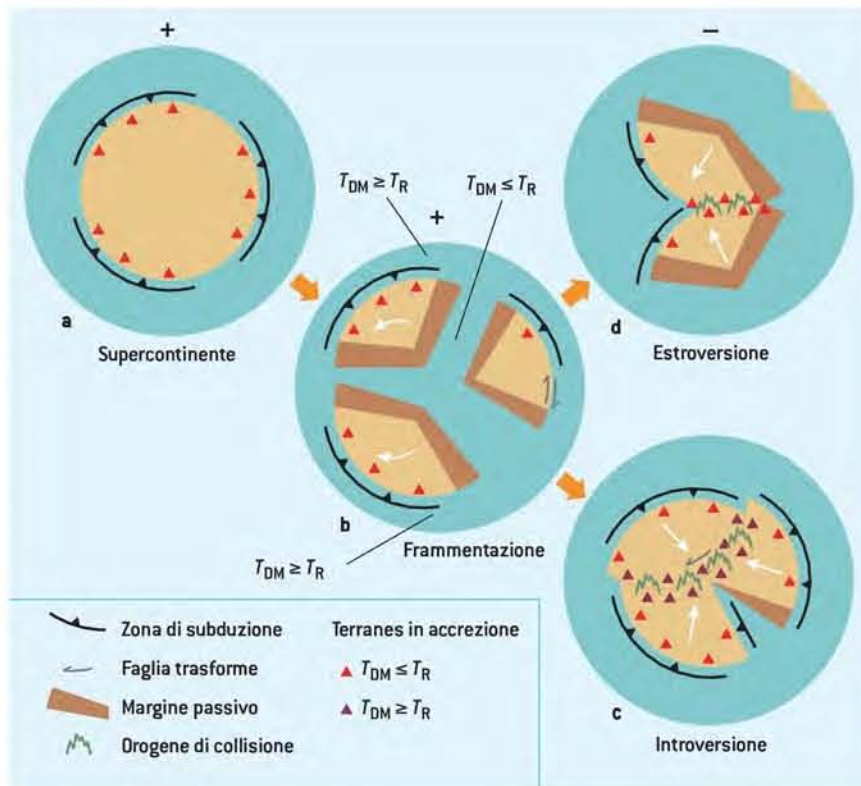
Facendo seguito alla frammentazione del supercontinente, i margini dei continenti alla deriva divengono tettonicamente inerti, o passivi, e di solito presentano ampie piattaforme continentali, come quelle che si sono sviluppate lungo i margini dell'Atlantico fin dalla frammentazione del supercontinente Pangea. Al tempo stesso, l'attività orogenetica legata alla subduzione continua lungo i bordi anteriori dei continenti alla deriva, provocando una successione di collisioni di terranes e una protratta attività vulcanica, come quella che ha caratterizzato il margine occidentale delle Americhe fin dalla frammentazione del Pangea.

Oceani interni o esterni?

Negli ultimi 30 anni, sono emersi due modelli contrastanti per quanto riguarda le forze globali che formano i supercontinenti. Questi modelli differiscono in relazione al tipo di oceano che si chiude durante l'aggregazione del supercontinente. Quando i supercontinenti si lacerano, si frammentano e si disperdono, il mondo eredita due tipi di oceano contrapposti. Tra i blocchi continentali alla deriva si creano oceani interni, pavimentati da litosfera oceanica più giovane dell'evento di lacerazione che ha condotto alla frammentazione del supercontinente. A circondare quest'ultimo, però, è un pavimento oceanico esterno in parte più vecchio dell'evento di lacerazione. Via via che l'oceano interno si amplia, l'oceano esterno deve contrarsi, di solito facendo andare in subduzione la

sua litosfera più vecchia. Ne risulta che il contrasto di età tra gli oceani interno ed esterno è massimo subito dopo la frammentazione del supercontinente, e diminuisce via via che i continenti risultanti si allontanano l'uno dall'altro.

In un modello di formazione di supercontinente, gli oceani interni si chiudono. Se il modello è corretto, il prossimo supercontinente verrà prodotto dalla chiusura dell'Oceano Atlantico e dalla risultante collisione di Europa e Africa con Nord e Sud America. Nell'altro modello, però, è l'oceano esterno a chiudersi. In questo caso, il prossimo supercontinente dovrebbe risultare dalla chiusura dell'Oceano Pacifico. L'Australia continuerebbe il suo movimento verso nord nell'Asia orientale, mentre il Nord e il Sud America continuerebbero a spostarsi verso ovest fino alla chiusura dell'Oceano Pacifico.

Ideato dal geofisico canadese J. Tuzo Wilson, il primo modello propone che la subduzione della litosfera oceanica generata tra i blocchi continentali in via di dispersione conduca in definitiva all'aggregazione di un nuovo supercontinente. In un processo spesso soprannominato «tettonica a fisarmonica», un tale supercontinente si «introverte». Pertanto i margini continentali interni del supercontinente in corrispondenza della fase di dispersione diventano le fasce orogenetiche interne del supercontinente successivo. L'evoluzione dell'orogene appalachiano-caledoniano-varisco, del Nord America e dell'Europa occidentale, è un possibile esempio di tale introversione. Qui la subduzione della litosfera oceanica creata dalla frammentazione di Pannotia, circa 550 milioni di anni fa, culminò nelle collisioni continente-continente associate all'aggregazione di Pangea circa 250 milioni di anni più tardi.

POSSIBILI FASI DI UN SUPERCONTINENTE circondato inizialmente da un oceano esterno con zone di subduzione e complessi vulcanici (*triangoli rossi*) lungo i margini (*a*). Al tempo della lacerazione (T_R), si crea un nuovo oceano interno (*b*). In questa fase vi sono un oceano esterno che contiene litosfera oceanica con un'età del mantello impoverito (T_{DM}) maggiore di T_R, e un oceano interno in cui T_{DM} è minore di T_R. L'età dei frammenti di litosfera oceanica unitisi ai continenti (terranes) è pertanto la chiave del meccanismo di aggregazione. Se l'oceano interno si chiude e il nuovo supercontinente si forma per introversione, la litosfera oceanica sarà più giovane di T_R (*c*). Ma se è l'oceano esterno a chiudersi, il processo è opposto e la litosfera oceanica sarà più vecchia di T_R (*d*).

In base all'età della litosfera oceanica è possibile ricostruire il meccanismo di aggregazione dei supercontinenti

Viceversa, il secondo modello propone che, in seguito alla frammentazione del supercontinente, i blocchi continentali in via di dispersione migrino fino alla parte opposta del globo. In questo modello, la risalita del calore del mantello intrappolato al di sotto del supercontinente finisce con il causare la frattura e la dispersione dei frammenti continentali risultanti verso le regioni antipodali di riaffondamento del mantello e di subduzione. Pertanto, in questo scenario il supercontinente si «estroverte», in modo che i suoi margini continentali esterni in corrispondenza della fase di dispersione divengano le fasce orogenetiche interne del supercontinente successivo.

Nel 1991, Paul Hoffman della Harvard University ipotizzò che la frammentazione del supercontinente Rodinia, circa 760 milioni di anni fa, abbia «rivoltato» il Gondwana. Dato che Gondwana è il nome assegnato a un'antica aggregazione dei continenti meridionali, questo evento è un esempio potenziale di estroversione. Secondo Hoffman, l'Oceano Pacifico iniziò a formarsi 760 milioni di anni fa, quando una massa continentale costituita da Australia e Antartide si separò da quella che era la parte occidentale del Nord America ancestrale.

Via via che questa massa continentale, che più tardi avrebbe formato il Gondwana orientale, si allontanava dal sito di lacerazione, l'antica crosta oceanica che circondava Rodinia andò in subduzione. Il processo proseguì finché il Gondwana orientale non entrò in collisione con l'aggregazione di Africa e Sud America (o Gondwana occidentale), circa 600-550 milioni di anni fa, per formare il supercontinente Pannotia. Così, in contrasto con l'introversione, in cui i più giovani oceani interni si chiudono a formare il supercontinente successivo, è l'oceano esterno a chiudersi per formare il supercontinente durante l'estroversione.

Che modello scegliere?

In realtà, la frammentazione e la riaggregazione del supercontinente per introversione ed estroversione occupano gli estremi di uno spettro di possibilità. Nondimeno, i due modelli presentano notevoli differenze, e producono modalità di aggregazione del supercontinente distinte, che dovrebbero essere riconoscibili nella documentazione geologica.

NASA

FAGLIE E FIUMI. Nell'immagine, il corso del Nilo (*linea giallo-verde*) nel Sudan settentrionale, e a destra di esso una netta faglia in diagonale. L'area tra la faglia e il fiume fa parte della zona di collisione dove due antichi continenti si sono scontrati 600 milioni di anni fa, formando il supercontinente Gondwana. Il Nilo non attraversa mai la faglia, che sembra controllarne il corso.

La chiave per determinare quale modalità operasse in un determinato periodo è nel calcolo dell'età della litosfera oceanica subdotta nell'assemblaggio del supercontinente. Nel caso dell'introversione, la litosfera è più giovane di quella della frammentazione del supercontinente, ma più vecchia di quella della sua successiva aggregazione. Viceversa, durante l'estroversione, la prima litosfera ad andare in subduzione sarà precedente alla frammentazione del supercontinente.

Purtroppo la subduzione di litosfera oceanica che culmina nella collisione continentale distrugge in generale parte della documentazione geologica che consentirebbe di distinguere tra i due modelli. Ma nella maggior parte degli orogeni vi sono siti in cui piccoli frammenti della litosfera oceanica in subduzione si staccano e aderiscono ai continenti, conservandosi. Inoltre, i complessi di isole vulcaniche (noti come archi insulari) che in origine si formavano al di sopra delle zone di subduzione, ma si trovano ora entro la litosfera oceanica in subduzione, possono essere troncati in corrispondenza delle zone di subduzione, dove vengono «raschiati via» dal fondo marino che scende in profondità per essere annessi al margine continentale. Di conseguenza, anche questi possono essere conservati nella documentazione geologica.

Nello scenario più semplice, le età di cristallizzazione di questi complessi aggregati rivelerebbero se essi siano più vecchi o più recenti della frammentazione del supercontinente. Dal momento che il contrasto di età tra la litosfera oceanica interna ed esterna è massimo subito dopo la frammentazione del supercontinente e diminuisce via via che i continenti vanno alla deriva, sono le età dei complessi aggregati per primi ad avere il maggiore valore per stabilire il tipo di oceano in cui si formarono.

In entrambi i modelli, comunque, la subduzione in atto nell'oceano che va chiudendosi può generare nuovi archi insulari vulcanici con un'età di cristallizzazione che postdaterà la frammentazione del supercontinente a prescindere dal tipo di oceano (interno o esterno) che sta andando in subduzione. Analogamente, alcuni archi vulcanici sono generati dalla subduzione in corrispondenza del margi-

ne continentale, e pertanto hanno età di cristallizzazione che postdatano l'instaurarsi della subduzione. In nessuno dei due casi le età di cristallizzazione di tali terranes possono essere usate per distinguere tra i due modelli. Comunque, per i terranes vulcanici la cui evoluzione è dominata dal riciclo di litosfera oceanica, esiste un metodo basato sugli isotopi che consente di ricostruire l'età della litosfera di origine. Questa età, che data la cristallizzazione non del terrane ma della litosfera oceanica che lo ha prodotto, può essere usata per distinguere tra i due modelli.

Gli isotopi sono atomi dello stesso elemento la cui massa differisce leggermente. Tutti gli atomi di un elemento hanno nel loro nucleo lo stesso numero di protoni, ma il numero di neutroni – e, con esso, la massa dell'atomo – può variare. Queste varianti sono gli isotopi dell'elemento, e la maggior parte degli elementi ha parecchi isotopi diversi. Alcuni isotopi sono radioattivi, vale a dire instabili, e decadono spontaneamente verso una forma più stabile, emettendo energia nel processo. Il tempo necessario perché metà dell'elemento «genitore» instabile decada nell'elemento «figlio», stabile, è detto «tempo di dimezzamento» dell'elemento radioattivo. Questo tempo è costante, e può essere misurato con precisione in laboratorio. Anche il rapporto tra elemento «genitore» e «figlio» può essere misurato, e questo, in combinazione con il tempo di dimezzamento del primo, può essere usato per calcolare la durata del decadimento. Il che, per una roccia vulcanica, corrisponde all'età di cristallizzazione.

Oltre al loro uso nella datazione di rocce e minerali, certi isotopi possono essere impiegati come traccianti per ottenere informazioni circa il materiale da cui la roccia vulcanica è derivata. Il lavoro pionieristico di molti scienziati, soprattutto di Don DePaolo dell'Università della California a Berkeley, ha dimostrato che il decadimento dell'elemento genitore samario (Sm) nell'elemento figlio neodimio (Nd) rappresenta uno dei migliori traccianti per i processi tettonici.

Per quanto l'evoluzione temporale degli isotopi Sm-Nd sia complessa, nei dettagli, essa è in un certo senso analoga alla storia dei primi europei che emigrarono nel Nord America (in secoli recenti). Alcuni aspetti del retaggio dei paesi di origine, come i cognomi, sono stati tramandati di generazione in generazione. Per questo, è possibile risalire nel tempo fino a dedurre la data della partenza del primo portatore di quel cognome dal paese di origine. In modo simile, se siamo a conoscenza dell'età di cristallizzazione di un campione di roccia, possiamo ricostruire l'evoluzione temporale del rapporto degli isotopi di Sm-Nd in quel campione e dedurre così la data in cui la progenie chimica nella roccia si discostò da ciò che viene chiamato mantello impoverito.

L'impoverimento è dovuto al fatto che gli elementi leggeri delle terre rare, tra cui Sm e Nd, si raccolgono nel liquido durante la fusione, lasciando il mantello privo di questi elementi. Samario e neodimio hanno un chimismo assai simile, e pertanto il loro rapporto non è praticamente alterato dai processi crostali. Per questo i due elementi passano «di generazione in generazione» durante gli eventi di riciclo crostale. È la collocazione nel tempo del distacco di una roccia dal mantello impoverito – ovvero la sua età di mantello impoverito, o T_{DM} – rispetto al momento della frammentazione di un supercontinente a rivelare in che modo il supercontinente successivo si sia formato. Disponendo di un gran numero di campioni di roccia, è possibile ricostruire l'evoluzione isotopica del neodimio e quindi distinguere chiaramente tra processi di introversione e di estroversione.

La tettonica a placche ha governato i processi dinamici del nostro pianeta negli ultimi **tre miliardi di anni**

La nascita di Pangea

I principali orogeni di collisione associati con l'aggregazione del supercontinente Pangea sono gli Appalachi, nella parte orientale del continente nordamericano, la Cintura caledoniana, che interessa le terre emerse europee prospicienti l'Atlantico settentrionale, e la Cintura varisca, che interessa l'Europa meridionale e i Monti Urali, in Russia. La frammentazione del supercontinente precedente, Pannotia, ebbe inizio circa 550 milioni di anni fa, consentendoci di definire due superfici di inviluppo, una per l'oceano interno e una per l'oceano esterno. Ricostruendo la discendenza dei campioni di roccia oceanica provenienti da queste fasce montuose fino a quando lasciarono il mantello impoverito, possiamo vedere in quale di queste due superfici andarono a ricadere i campioni e quindi distinguere tra introversione ed estroversione come meccanismo di aggregazione del Pangea.

Se i terranes oceanici che hanno subito accrezione durante l'aggregazione del Pangea fossero derivati dall'oceano interno, essi dovrebbero essersi separati dal mantello meno di 550 milioni di anni fa. Per quanto i dati isotopici del neodimio non siano ancora disponibili per gli Urali, esiste un gran numero di terranes oceanici all'interno di altri orogeni le cui rocce indicano una provenienza da un oceano interno. I valori iniziali dei rapporti di neodimio al momento della loro cristallizzazione ricadono molto vicini alla curva del mantello impoverito, il che fa pensare che la loro formazione coincida con l'uscita del magma dal serbatoio del mantello impoverito.

Sappiamo che gli Appalachi si formarono in seguito alla chiusura di un oceano denominato Giapeto e contengono terranes associati sia con la nascita sia con la successiva distruzione di tale oceano. In Québec, rocce di questi terranes, vecchie di 600 milioni di anni, hanno rapporti iniziali di neodimio molto alti, che indicano una derivazione dal mantello impoverito. L'età di queste rocce coincide con la frammentazione di Pannotia, il precedente supercontinente. Analogamente, a Terranova, terranes oceanici di circa 480 milioni di anni fa andarono in obduzione sul Nord America ancestrale al richiudersi dell'Oceano Giapeto e hanno rapporti iniziali di neodimio tipici del mantello impoverito di 480 milioni di anni fa. Pertanto possono essere considerati vestigia di un oceano interno.

Di conseguenza i terranes oceanici associati sia con l'apertura sia con la chiusura di Giapeto hanno composizioni che ricadono in corrispondenza o in immediata prossimità del T_{DM} ai tempi di deposizione, cosicché le loro età corrispondono al momento della cristallizzazione, che non supera l'epoca della frammentazione di Pannotia. Tali dati confermano che la litosfera oceanica che generò queste serie si formò in un oceano interno.

La Cintura varisca dell'Europa occidentale si costituì tra circa 320 e 285 milioni di anni fa in seguito alla chiusura di un oceano denominato Reico. I terranes associati sia con la lacerazione sia con la subduzione successiva di questo oceano si conservano in Gran Bretagna, Francia e Spagna. Nel Massiccio Centrale francese, per esempio, i basalti che si formarono durante la prima fase di formazione di questo oceano, circa 480 milioni di anni fa, presentano rapporti di neodimio simili a quelli del coevo mantello impoverito. La stessa cosa si può dire per le rocce basaltiche francesi e spagnole di 360-350 milioni di anni fa. La corrispondenza tra il modello del mantello impoverito e le età di cristallizzazione per i campioni di Reico fa pensare che le sorgenti litosferiche oceaniche di queste serie si siano generate dopo la frammentazione di Pannotia e, pertanto, in un oceano interno. Per concludere, Pangea non può essersi formato che per introversione.

NASCITA DI UN SUPERCONTINENTE. Come mostrano i dati isotopici, Pannotia, frammentandosi circa 550 milioni di anni fa, creò oceani interni come Giapeto (*b*) e Reico (*c*). Con la chiusura di questi oceani, 300 milioni di anni fa, si formò per introversione Pangea (*d*).

L'aggregazione di Pannotia

Ma l'introversione è il solo modo in cui un supercontinente può formarsi? Per verificare questa possibilità, controlliamo i dati provenienti dagli orogeni collisionali associati all'aggregazione di Pannotia, circa 600 milioni di anni fa. Questi orogeni comprendono la cintura di Borborema, in Brasile, e le fasce trans-sahariana e del Mozambico dell'Africa settentrionale e orientale, che conservano terranes derivati dagli oceani che si chiusero per formare Pannotia. Dal momento che il supercontinente precedente, Rodinia, si frammentò circa 760 milioni di anni fa, questi terranes dovrebbero avere meno di 760 milioni di anni, mentre molti di quelli derivati dall'oceano esterno dovrebbero avere età comprese tra 760 e 1100 milioni di anni, approssimativamente la durata di Rodinia.

Nella provincia di Tocantins, in Brasile, terranes di arco insulare con età di cristallizzazione compresa tra 950-850 milioni di anni e 760-600 milioni di anni hanno rapporti iniziali di neodimio tra + 0,2 e + 6,9, e T_{DM} tra 1200 e 900 milioni di anni. Nella cintura orogenetica trans-sahariana dell'Algeria e del Marocco, i terranes di arco insulare hanno T_{DM} tra 1200 e 950 milioni di anni. Anche la cintura del Mozambico contiene una varietà di terranes di arco insulare. All'estremità settentrionale della cintura, in Sudan, rocce basaltiche di 800 milioni di anni hanno T_{DM} tra 900 e 800 milioni di anni. Pertanto ciascuno di questi orogeni contiene terranes oceanici che hanno subito accrezione e hanno T_{DM} superiori all'età di frammentazione – 760 milioni di anni – di Rodinia: sono quindi più antichi. Pannotia perciò si deve essere formato per estroversione.

Ammettere che i supercontinenti si sono ripetutamente assemblati e dispersi negli ultimi tre miliardi di anni fa ritenere che la tettonica a placche abbia agito sulla Terra per tutto questo periodo, causando ripetute aggregazioni e dispersioni di supercontinenti. L'analisi attuale mostra però che i supercontinenti si possono formare tramite meccanismi diversi. Sembra che, dopo la frammentazione di Rodinia, i continenti siano migrati verso zone di subduzione influenzando la formazione e la localizzazione di Pannotia.

I meccanismi responsabili della formazione di Pangea sono più difficili da dedurre. Ad avvicinare i continenti è stata la generazione di nuova litosfera nell'oceano esterno o la subduzione rapida nell'oceano interno che ha consentito a materiale caldo del mantello di risalire nell'oceano esterno? È evidente che il meccanismo responsabile della formazione di Pangea continua a sfuggirci, quasi come accadeva quando la sua esistenza fu ipotizzata da Alfred Wegener, il padre della deriva dei continenti, quasi 100 anni fa.

PER APPROFONDIRE

GURNIS M., *Large-scale Mantle Convection and the Aggregation and Dispersal of Supercontinents*, in «Nature», Vol. 322, pp. 695-699, 1988.

HOFFMAN P. F., *Did the Breakout of Laurentia turn Gondwana inside out?*, in «Science», Vol. 252, pp. 1409-1412, 1991.

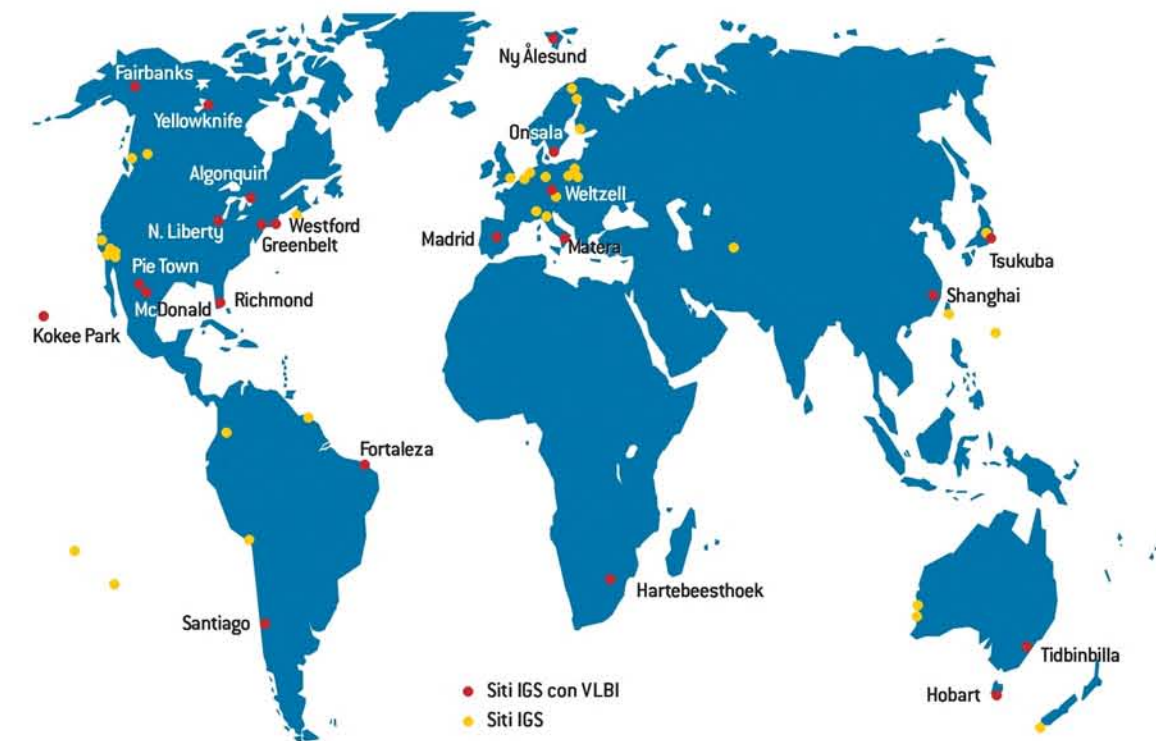
MURPHY J. B. e NANCE R. D., *Do Supercontinents Introvert or Extrovert? Sm-Nd Isotopic Evidence*, in «Geology», Vol. 31, pp. 873-876, 2003.

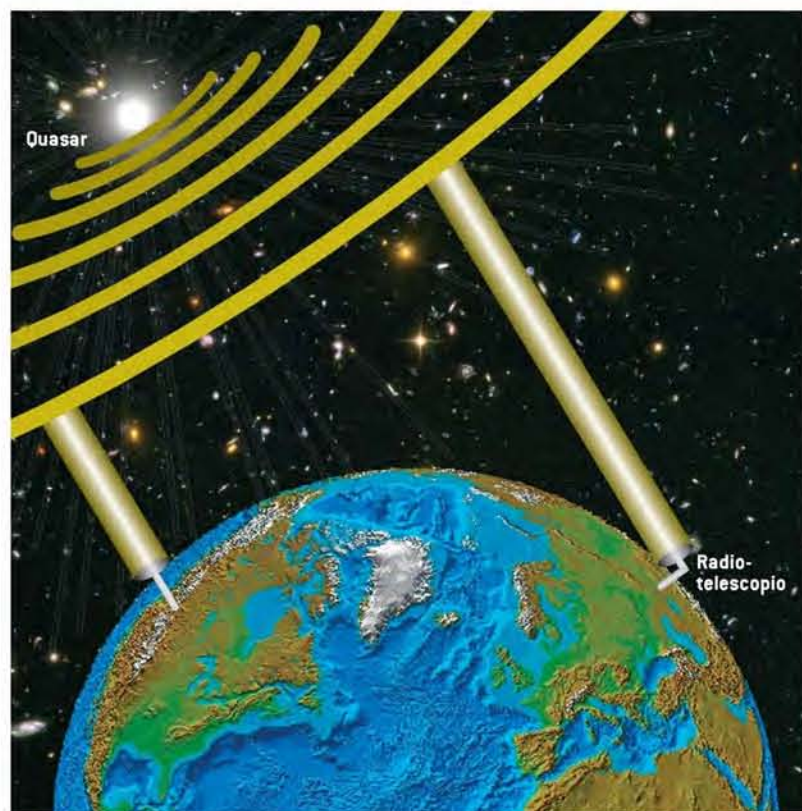
Il lento viaggio dei continenti

di Cristina Valsecchi

Oggi il movimento delle placche terrestri è seguito grazie a una rete mondiale di radiotelescopi in grado di misurare spostamenti millimetrici

Cristina Valsecchi

Inizio di maggio. La temperatura a Ny Ålesund è di uno o due gradi sotto zero, quanto basta per impedire al sole di sciogliere la neve sulla strada che collega il centro abitato all'aeroporto. Alle nostre spalle c'è il villaggio: una sessantina di casette affacciate sulle acque gelate del Kongsfjorden, dove vivono e lavorano ricercatori di quindici nazioni, impegnati nello studio dell'ambiente e del clima artico. Ny Ålesund è l'insediamento civile più a nord del mondo, situato a cavallo del 79° parallelo, a soli 1200 chilometri dal Polo nord, sulla costa occidentale dell'isola norvegese di Spitzbergen. Davanti a noi si intravede la striscia di asfalto dove atterra, due volte a settimana, un bimotore carico di scienziati e attrezzature. Nei mesi invernali, è l'unico legame tra Ny Ålesund e il resto del mondo.

LA GRANDE ANTENNA DELL'OSSERVATORIO GEODETICO DI NY ÅLESUND (*a fronte*) è una delle strutture di rilevamento (*punti in rosso*) per la Very Large Baseline Interferometry dell'International GPS Service for Geodynamics (IGS), che comprende anche molti centri di elaborazione dati (*punti in giallo*).

UN AIUTO DAI QUASAR

Quando il segnale radio emesso da un quasar raggiunge due antenne distanti tra loro sulla superficie terrestre, le onde raccolte da ciascuno strumento hanno percorso un cammino di lunghezza diversa, anche se la distanza tra le antenne è minima rispetto al viaggio tra il quasar e la Terra. La differenza tra i due cammini si traduce in un ritardo di fase tra le due onde rispetto a un parametro temporale unico. Tutti i radiotelescopi della rete sono dotati di orologi atomici ad altissima precisione sincronizzati tra loro. Il segnale ricevuto da ogni strumento viene associato al tempo scandito dall'orologio in modo che, raccogliendo i dati forniti da tutti i telescopi della rete, sia possibile confrontare le onde e determinare le differenze di fase. Dal ritardo di fase si calcola la distanza tra le antenne, con la precisione di un millimetro su migliaia di chilometri. Misurando con diverse antenne la posizione di alcuni dei 608 quasar noti sulla volta celeste, si determina invece l'orientamento dell'asse di rotazione della Terra rispetto al Sistema di riferimento celeste internazionale.

La nostra meta è l'edificio dell'Osservatorio geodetico, dove abbiamo appuntamento con Helge Digre e David Holland, i responsabili della stazione. Il loro lavoro è misurare la Terra usando come punto di riferimento gli oggetti più lontani dell'universo: i quasar. Mentre ci avviciniamo, la grande antenna parabolica bianca che sorge accanto alla pista d'atterraggio ruota lentamente. «La sua velocità è di due gradi al secondo – spiega Holland – e può puntare in qualunque direzione nella volta celeste con un'accuratezza di 0,002 gradi nelle giornate senza vento e di 0,011 gradi in condizioni atmosferiche avverse.»

«È sensibile alle microonde comprese nelle due bande di frequenza da 2 a 2,5 Ghz [gigahertz] e da 8 a 8,5 Ghz», continua Helge Digre. «Ce ne serviamo per raccogliere i segnali emessi dai quasar, oggetti dotati di enorme energia, lontani miliardi di anni luce dalla Terra. Puntiamo l'antenna verso un quasar, raccogliamo la sua radiazione e associamo la fase del segnale al tempo scandito da un orologio a idrogeno ad altissima precisione. Le nostre misurazioni vengono poi confrontate con quelle effettuate da altre antenne sparse sulla superficie del pianeta e puntate sulla stessa stella. In base alla differenza di fase tra i segnali ricevuti da due antenne, è possibile calcolare la distanza tra le antenne con l'accuratezza di un millimetro su migliaia di chilometri.»

Questa tecnica, la radio interferometria a lunghissima base (VLBI, da Very Large Baseline Interferometry), permette di misurare i movimenti delle placche tettoniche, le deformazioni regionali della crosta terrestre, i fenomeni di innalzamento e subsidenza. Inoltre, individuando con precisione la posizione dei quasar sulla volta celeste, le antenne consentono di stabilire la posizione del nostro pianeta nel sistema di riferimento dei quasar e calcolare le oscillazioni dell'angolatura terrestre dovute allo spostamento di grandi masse d'aria nell'atmosfera, alle correnti oceaniche e ai processi geologici interni.

Una rete mondiale di radiotelescopi

La VLBI si basa su una rete mondiale di circa 50 antenne distribuite su entrambi gli emisferi. «La stazione di Ny Ålesund è la più vicina al Polo nord», spiega Digre. «E questo ne fa uno strumento prezioso, perché costituisce una sorta di ponte tra la rete di osservatori pacifico-asiatica, quella europea e quella americana. A seconda del tipo di misurazioni che dobbiamo effettuare, lavoriamo in contemporanea con un numero variabile di altre antenne, da 5 a 20. Memorizziamo i nostri dati su nastri magnetici e li spediamo a un centro di raccolta comune che elabora quelli di tutti gli osservatori coinvolti nel progetto.»

Oltre alla posizione favorevole, l'importanza dell'antenna di Ny Ålesund è dovuta a un altro fattore: l'assenza di inquinamento elettromagnetico nella banda delle microonde nell'area dell'osservatorio. «Oggi la maggior parte dei sistemi di telecomunicazione trasmette nella banda delle microonde – dice David Holland – e ovviamente questa folla di radiazioni disturba la ricezione dei segnali provenienti dai quasar. Ny Ålesund da questo punto di vista è un'area quasi incontaminata. Un regolamento molto severo, stabilito di comune accordo tra gli enti di ricerca che operano sul posto, vieta l'installazione di trasmettitori che interferiscano con le nostre frequenze. Per intenderci: qui i cellulari non hanno campo. Le uniche perturbazioni provengono dai satelliti in orbita polare, sia scientifici sia televisivi.»

Un'altra occasionale fonte di disturbo è un telefono cordless installato di recente nella stazione per lo studio dell'atmosfera situata sulla cima del monte Zeppelin, alle spalle del villaggio. «Dovremo fare qualche cosa per risolvere il problema: ogni volta che qualcuno telefona da lassù, sulla vetta dello Zeppelin compare un quasar!», commenta Holland.

Le origini dell'interferometria a lunghissima base risalgono alla fine degli anni sessanta. La costruzione dei primi radiotelescopi, dopo la seconda guerra mondiale, aveva aperto la strada allo studio di oggetti remoti emettitori di onde radio, invisibili ai telescopi ottici. Per migliorare la risoluzione angolare dei radiotelescopi, gli astronomi svilupparono la tecnica dell'interferometria: combinando i segnali raccolti da due antenne puntate sullo stesso oggetto, si ottiene un'immagine con la risoluzione equivalente a quella di un telescopio che ha il diametro uguale alla distanza tra le due antenne. Nei primi interferometri, le antenne erano fisicamente collegate da cavi e distavano pochi chilometri. A metà degli anni sessanta si cominciò a parlare di interferometria a grande base, e nel 1967 nasceva la prima rete internazionale di radiotelescopi, distanti migliaia di chilometri.

Usata da principio solo in campo astronomico, presto la VLBI fu applicata anche alla geodesia e alla geologia, tanto che negli anni ottanta le misurazioni effettuate con i radiotelescopi utilizzando i quasar come punti di riferimento fornirono la prima verifica sperimentale del moto delle zolle tettoniche.

Una sentinella per il clima

Oggi la VLBI è preziosa anche per lo studio dell'atmosfera e del clima. «La Terra è come un palloncino pieno d'aria – spiega Digre – che si gonfia e si sgonfia continuamente. Le variazioni di pressione atmosferica e le perturbazioni più potenti fanno oscillare l'asse di rotazione del pianeta. Tanto per fare un esempio, di recente le nostre misurazioni hanno consentito di calcolare gli effetti di El Niño sulla rotazione terrestre. E la National Oceanic and Atmospheric Administration, l'ente statunitense per lo studio del clima, si serve dei nostri dati per formulare previsioni del tempo a lungo termine sul continente americano.»

In virtù della sua posizione, nei prossimi anni l'Osservatorio geodetico di Ny Ålesund sarà coinvolto nello studio degli effetti del riscaldamento globale sul livello dei mari e sulla dinamica delle correnti atmosferiche e oceaniche. «Le prime regioni – continua Digre – a risentire dei cambiamenti climatici saranno le calotte polari. A noi spetta il ruolo di sentinella. Forniremo un sistema di riferimento utile per misurare le variazioni del livello del mare e gli scambi di energia tra l'atmosfera e la crosta terrestre.»

Ma non è tutto. Accanto alla grande antenna del radiotelescopio si trovano altre due strutture metalliche più piccole, a forma di fungo. Sono terminali riceventi dei due sistemi di posizionamento satellitare globale oggi attivi: il GPS, gestito dagli Stati Uniti, e il suo omologo russo Glonass. Entrambi si basano su flotte di satelliti artificiali in orbita geostazionaria intorno al pianeta, che trasmettono continuamente segnali radio a terra. I ricevitori captano i segnali provenienti da quattro satelliti e forniscono all'utente le coordinate esatte della sua posizione. «Il sistema di riferimento del GPS e del Glonass dipende dal centro di massa della Terra, perché i satelliti ruotano intorno al baricentro del pianeta – spiega Digre – ma la Terra non è un corpo omogeneo. Il sistema di riferimento che adottiamo dipende invece dagli oggetti più lontani dell'universo: è un sistema di riferimento inerziale esterno al pianeta. Le indicazioni che forniamo sono più accurate e affidabili di quelle fornite da GPS e Glonass. Infatti la VLBI è usata per tarare i due sistemi e correggere i loro errori nel corso di misurazioni che richiedono la massima precisione.»

NOTO, MEDICINA E MATERA: I RADIOTELESCOPI ITALIANI

«La ricerca italiana è fortemente impegnata nel settore della radio interferometria a lunghissima base», dice Gianni Tofani, direttore dell'Istituto di radioastronomia del CNR. «Facciamo parte della rete VLBI europea con tre antenne. Due appartengono al nostro istituto e si trovano a Noto, in Sicilia, e a Medicina, nei pressi di Bologna, la terza è dell'Agenzia spaziale italiana e si trova a Matera.»

I radiotelescopi di Noto e Medicina sono gemelli, entrambi attivi dagli anni ottanta. Hanno un diametro di 32 metri e operano a diverse bande di frequenza. «Alcune bande sono dedicate alle osservazioni astronomiche: quella compresa tra 1,4 e 1,6 Ghz, e le due bande a 5 e 22 Ghz – spiega Tofani – mentre le bande a 2 e 8 Ghz sono dedicate alle misurazioni di geodinamica.» L'antenna di Matera – più piccola, con il suo diametro di 20 metri – riceve solo nelle bande a 2 e 8 Ghz, e viene utilizzata unicamente per lo studio della Terra. «Il radiotelescopio di Noto è l'estremo meridionale della rete europea – continua Tofani – e la sua presenza è un importante contributo all'estensione della rete. Di recente, lo specchio dell'antenna di Noto è stato modificato con l'aggiunta di un sistema a ottiche attive, che corregge le perturbazioni gravitazionali e garantisce prestazioni migliori.»

Una nuova antenna, più grande e quindi più sensibile di quelle già attive, è in costruzione in Sardegna, nelle vicinanze di Cagliari. «Avrà un diametro di 64 metri, il doppio rispetto ai telescopi di Medicina e Noto – illustra Gianni Tofani – e grazie al suo contributo la rete VLBI europea acquisterà maggiore sensibilità rispetto a quella americana. Potremo così osservare radiosorgenti celesti più deboli. Anche l'antenna di Cagliari sarà dotata di un sistema di ottiche adattative. Il completamento dei lavori è previsto entro il 2006 e i primi test per l'inizio del 2007.»

In campo astronomico, i radiotelescopi italiani sono usati per l'osservazione dei quasar, delle galassie emettitrici di onde radio e per l'analisi spettroscopica delle nubi di gas e polvere all'interno della Via Lattea. «In campo geodinamico – conclude Tofani – le ricerche italiane hanno prodotto risultati interessanti, in virtù della particolare geofisica del nostro paese, che si trova in un'area molto attiva.»

L'ANTENNA DI MEDICINA è uno dei tre radiotelescopi italiani della rete VLBI europea. Dal 2007 ce ne sarà un quarto, presso Cagliari.